

## ВСТУП

Опір матеріалів є наукою про інженерні методи розрахунку елементів споруд та машин на міцність, жорсткість і стійкість.

Найбільш важливим завданням опору матеріалів є виявлення причин та характеру руйнування конструкцій. Хоча це явище відоме здавна, його суть зрозуміла не повністю.

В опорі матеріалів тісно пов'язані теорія та експеримент, тому вивчення курсу опору матеріалів звичайно супроводжується роботами в механічній лабораторії. Вони дають базу при вивченні цієї дисципліни.

Роботи в лабораторії ставлять метою:

- познайомити студентів з основними механічними характеристиками матеріалів;
- показати закони, що пов'язують між собою напруження та деформації;
- проілюструвати фізичну суть явищ при різних деформаціях;
- обґрунтувати ті гіпотези, на яких базуються теоретичні висновки опору матеріалів.

До механічних характеристик матеріалів, що визначають їхню здатність опиратися зовнішнім силам, відносяться:

- модуль пружності та коефіцієнт Пуассона;
- межа пружності;
- межа пропорційності;
- межа текучості;
- межа міцності (тимчасовий опір);
- межа стомленості (витривалості);
- опір ударним навантаженням;
- питома робота деформації та ін.

Характеристики, що визначають здатність матеріалів деформуватися при навантаженні, є такі:

- абсолютна й відносна деформації (лінійна й кутова);
- прогин і кут повороту перерізу;
- кут закручення;
- поперечна деформація.

У лабораторних роботах передбачено вивчення властивостей як металевих (сталь, чавун) і неметалевих (дерево, пластмаса), так і композитних матеріалів, що дістали широке застосування в останні роки.

Перш ніж приступити до виконання тієї чи іншої лабораторної роботи, студент повинен засвоїти теоретичний матеріал, познайомитись з описом машин та приладів для визначення напружень і деформацій під час випробувань. Схеми зразків, принципові схеми машин та приладів, дані попередніх обмірів і експериментів необхідно заносити в спеціально розроблений журнал.

# 1. МАШИНИ ТА ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ

## 1.1. Універсальна випробувальна машина УВМ-50

На цій машині передбачена можливість виконання випробувань на розтяг, стиск та згин при максимальному навантаженні 500 кН (50 тс). Схема машини наведена на рис. 1. Машина складається з трьох основних вузлів: силовий агрегат, силовимірювач та робоча частина.

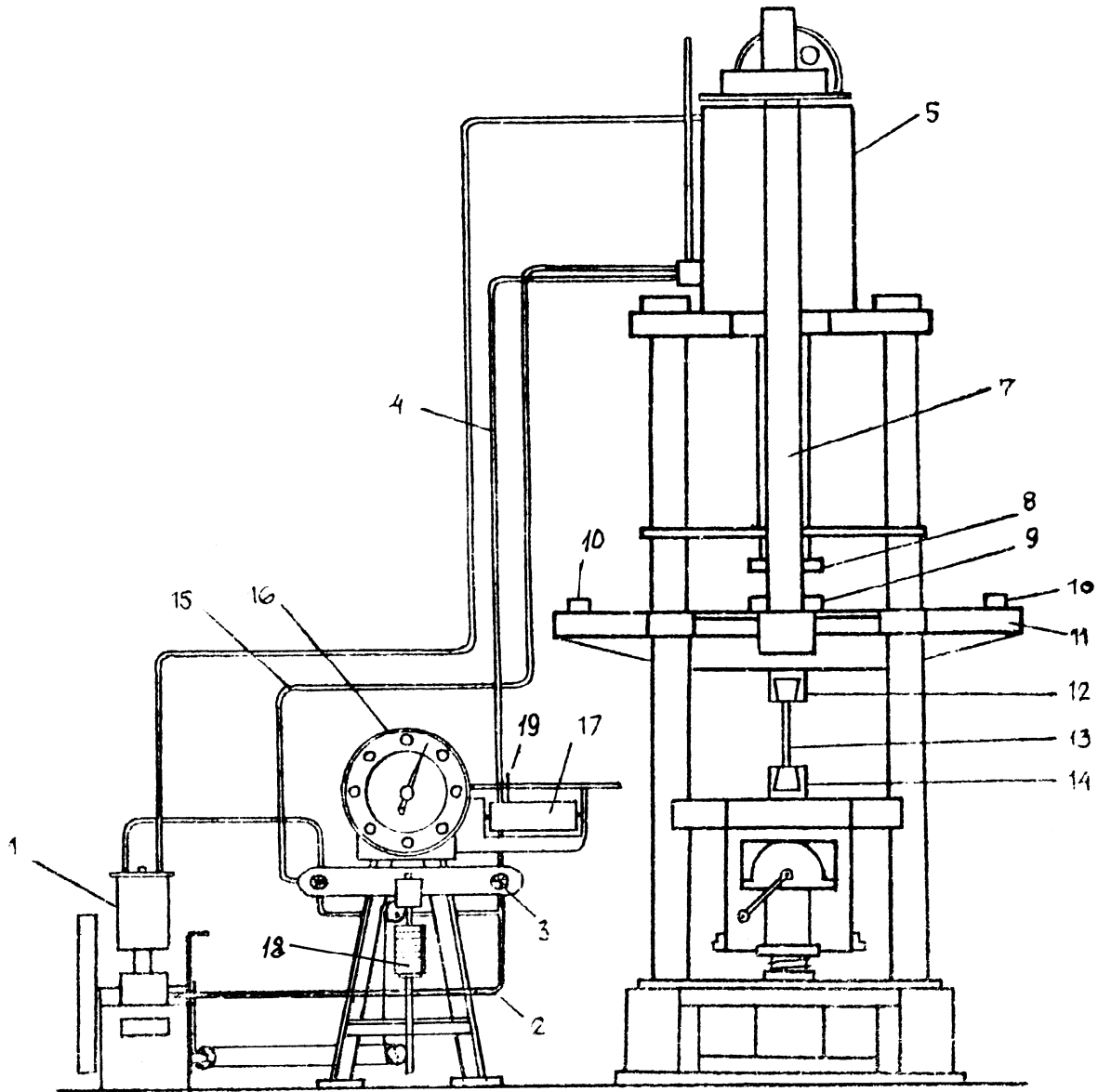


Рис. 1.

Силовий агрегат являє собою гідравлічний насос 1, який приводиться до дії електричним двигуном. Силовий агрегат зв'язаний трубопроводами 2, 4, 15 з силовимірювачем та робочою частиною.

Силовимірювач складається з гідравлічного циліндра, шток якого через важель з'єднаний з маятником 18. Маятник через зубчасту передачу пов'язаний

зі стрілкою шкали 16 силовимірювача, а також через зубчасту рейку з олівцем 19, який зміщується уздовж осі барабана 17. Кут відхилення маятника, а отже й кут поворота стрілки на шкалі 16 та величина зміщення олівця на барабані 17 залежить від тиску рідини в циліндрі силовимірювача.

Робоча частина – це гідравлічний прес. Під тиском рідини поршень робочого циліндра 5 зміщується угору і піднімає через тяги 7 траверсу 11. При такому переміщенні між її захватом 12 та нижнім нерухомими захватом 14 станини здійснюється розтяг, а між упором 9 траверси та верхнім нерухомим упором 8 стиск. При випробуваннях на згин балку розміщують на верхніх опорах 10 траверси.

До траверси прикріплена нитка, другий кінець якої перекинутий через шків барабана 17 силовимірювача. Отже при переміщенні траверси барабан 17 повертається навколо своєї осі на відповідну величину.

При випробуваннях робоча рідина від насоса 1 через трубопровід 2, регулювальний вентиль 3 та трубопровід 4 подається до робочого циліндра 5. Поршень циліндра приходить в рух, приводячи до переміщення траверси 11. Отже здійснюється навантаження на зразок: стиск, або згин над траверсою чи розтяг – під нею. Величина навантаження визначається тиском рідини у робочому циліндрі. Завдяки трубопроводу 15, що з'єднує робочий циліндр та силовимірювач, означений тиск передається на циліндр силовимірювача. Отже залежно від тиску робочої рідини стрілка на шкалі 16 силовимірювача відображає величину навантаження. При цьому олівець 19 на барабані 17 креслить криву залежності між навантаженням і переміщенням траверси (подовженням або покоротшенням відповідно розташованого зразка).

## **1.2. Механічна машина ВМ-4Р для випробувань на розтяг**

Машина ВМ-4Р призначена для випробувань матеріалів на розтяг. Максимальне зусилля, яке може бути досягнуто при випробуваннях, – 40 кН (4 тс).

Кінематична схема машини наведена на рис. 2.

Зразок встановлюють у зачіпки 21, які можна змінювати залежно від форми та розмірів зразка. Швидке пересування нижньої зачіпки при встановленні зразка здійснюється вручну за допомогою маховика, закріпленого на верхній частині гвинта 7. Завантаження здійснюється від електродвигуна 1 або вручну рукояткою 4. Рух від двигуна передається через систему черв'якових 13,9 та зубчастих 12,2 передач на гайку 10.

При обертанні гайки 10 гвинт 7 зміщується донизу. Закріплений у машині зразок з'єднує верхню і нижню зачіпки, за рахунок чого переміщення нижньої зачіпки викликає переміщення і верхньої зачіпки. Остання з'єднана з важелем 5, а через тягу 17 з маятником 3. Величина навантаження на зразок визначається відхиленням маятника 3 від вертикалі. Маятник з'єднаний важелем 18 з кареткою 14, яка пересувається уздовж шкали 6, відзначаючи відхилення маятника, а отже, і величину навантаження. Ціна поділки шкали становить 50 Н при одному вантажі на маятнику 3 і 100 Н при двох вантажах.

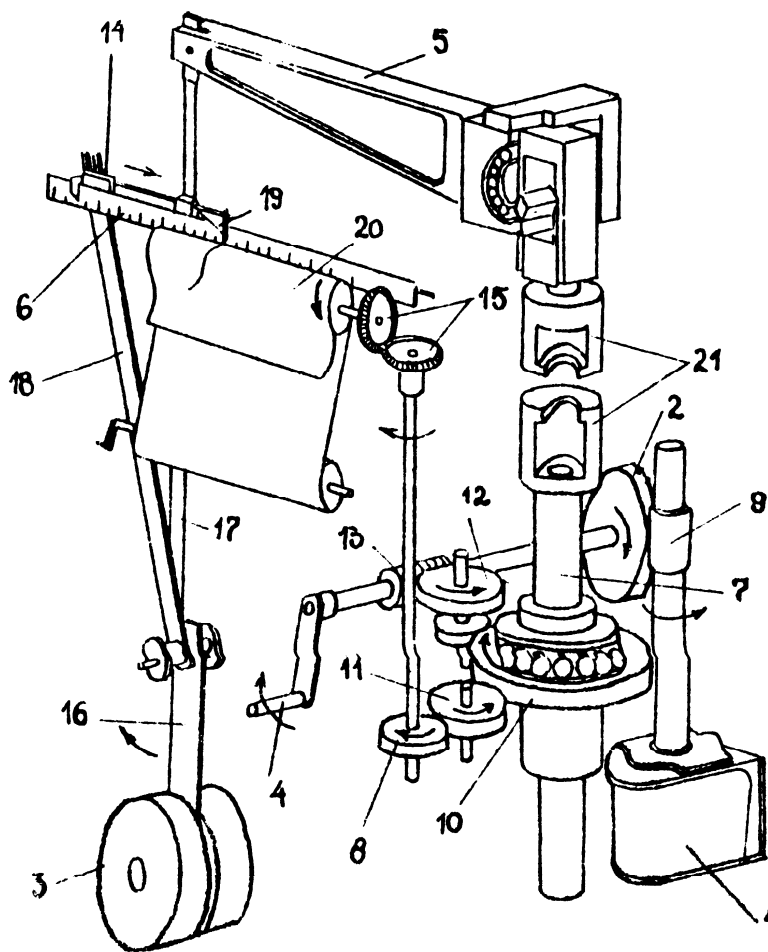


Рис. 2.

Машина має діаграмний пристрій, який дозволяє автоматично реєструвати результати випробувань. Олівець 19, закріплений у каретці 14, рухається вздовж барабана 20, оберненого міліметровим папером. Кут оберту барабана залежить від переміщення нижньої зачіпки 21, з якою він зв'язаний системою передач 8 та 15. Отже при випробуваннях на папері викреслюється графік залежності подовження зразка від навантаження.

### 1.3. Випробувальна машина АМ-1

Машина АМ-1 призначена для проведення випробувань на кручення.

Схема машини наведена на рис. 3.

Зразок 2 закріплюють у зачіпках 1 машини. Прикладення крутного моменту здійснюється за допомогою рукоятки 3 силозбуджувача та зубчастої передачі. Права зачіпка при цьому обертається, викликаючи поворот лівої зачіпки, а отже і відхилення маятника 4 з вантажем  $Q$ . Відхилення маятника від вертикалі визначає величину крутного моменту  $M_k$ . Маятник через систему передач 6 зв'язаний із стрілкою шкали 5 силовимірювального пристрою, на якому реєструється величина  $M_k$ . Машина обладнана діаграмним пристроєм, на

барабані 7 якого викреслюється крива залежності кута закручення від величини крутного моменту.

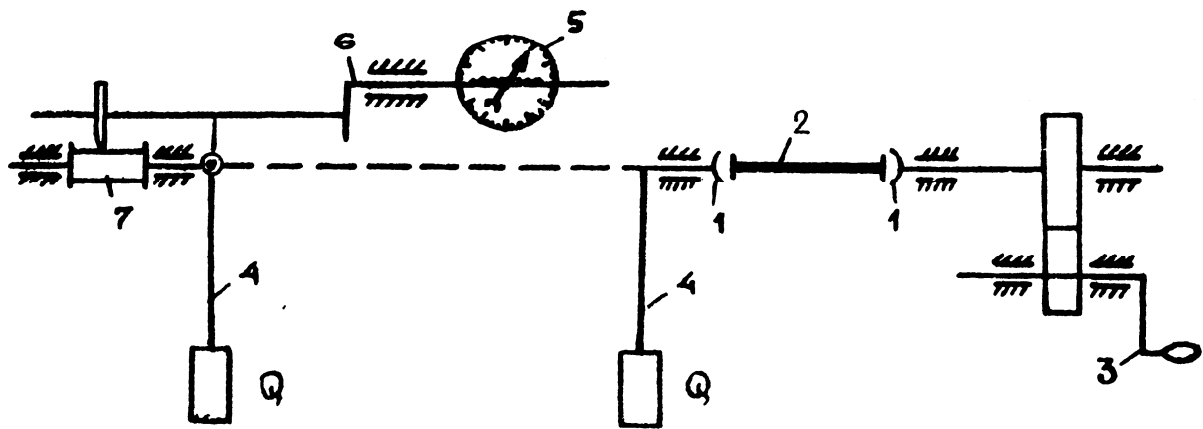


Рис. 3.

#### 1.4. Маятниковий копер

Копер призначений для випробувань на ударну в'язкість матеріалів. Схема копра наведена на рис. 4.

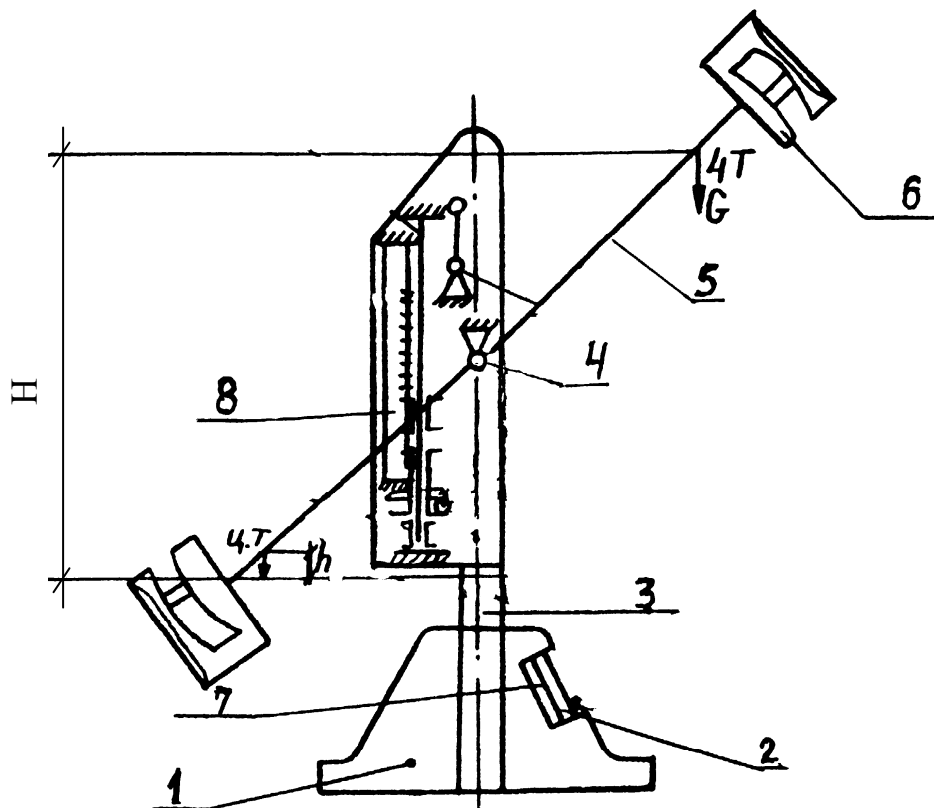


Рис. 4.

Машина має чавунну основу 1, на якій закріплені загартовані опори 2. На основі змонтовані два стояки 3, між якими закріплена вісь 4 маятника 5 з молотом 6. Маятник має пристрій, що дозволяє встановити його на певний кут зарядження (на певну величину  $H$ ). Зразок 7 при випробуванні кладуть на опори 2. Реєструючий пристрій 8 копра влаштований так, що його показчик відзначає на шкалі різницю між висотою  $H$  маятника у вихідному положенні та висотою  $h$  після руйнування зразка.

Маятник вагою  $G$ , піднятий на величину  $H$ , має певний запас енергії. При своєму падінні він витрачає частину енергії на руйнування зразка і, отже після проходження вертикалі підніметься на меншу величину  $h$ . Різниця  $H - h$  визначає роботу, витрачену на руйнування зразка:

$$A = G(H - h).$$

### 1.5. Машина для випробувань на витривалість

Випробування на витривалість проводять на машині, схема якої наведена на рис 5.

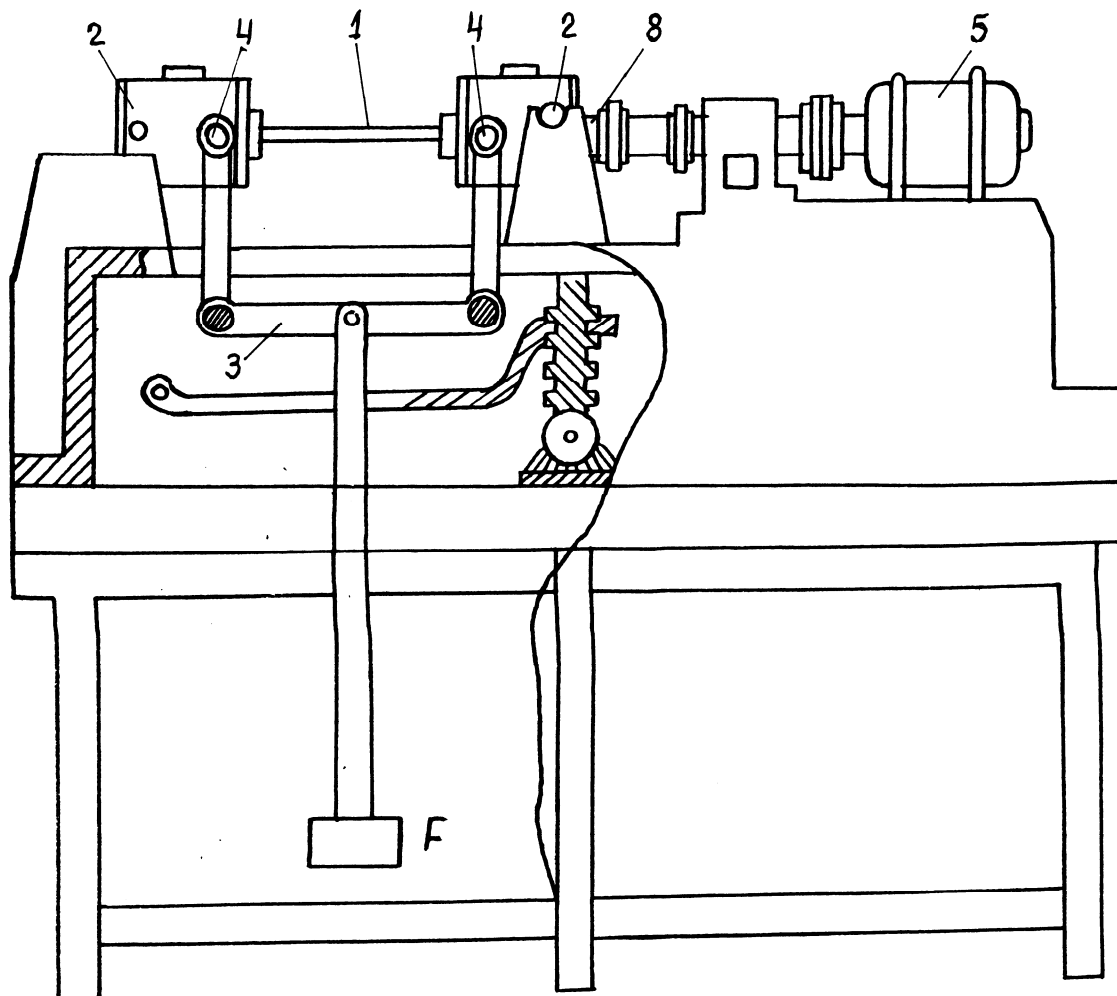


Рис. 5.

Зразок 1 встановлений в нерухомих підшипниках 2. Навантаження  $F$  передається на зразок через систему важелів та плаваючі підшипники 4. Електродвигун 5 через редуктор 7 та зачіпку 8 передає обертання на зразок. Оскільки площа навантаження залишається вертикальною, то при обертанні кожен переріз зразка зазнає змінних за величиною та знаком напружень. Кількість обертів, тобто кількість циклів завантаження, фіксується лічильником.

При руйнуванні зразка електродвигун автоматично вимикається.

## 1.6. Важельний тензометр

Тензометри, зокрема важельний тензометр Гугенбергера, є приладами, призначеними для вимірювання деформацій.

Важельний тензометр (рис. 6) являє собою прилад, що працює за принципом механічного відліку подовжень.

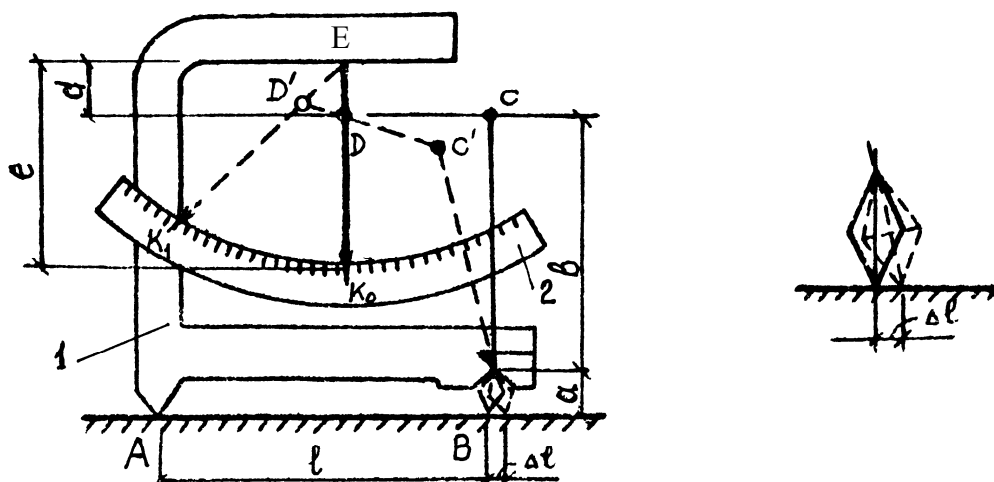


Рис. 6.

Станина 1 приладу має дві гострі ніжки: нерухому  $A$  й рухому  $B$  у вигляді призми, що хитається. Відстань  $AB$  називають базою приладу  $\ell$ . З рухомою призмою  $B$  жорстко зв'язаний важель  $BC$ , інший кінець якого шарнірною тягою  $CD$  з'єднується зі стрілкою прилада  $EK_0$ .

При подовженні бази тензометра на величину  $\Delta\ell$  призма  $B$  разом з важелем  $BC$  нахилиється, кінець важеля зміщується в положення  $C'$  і кінець тяги  $D$  переходить у положення  $D'$ , відхиляючи стрілку приладу. Різниця відліків  $K_1K_0 = \lambda$  пропорційна подовженню бази  $\Delta\ell$ :

$$CC' = \Delta\ell \cdot \frac{b}{a};$$

$$\frac{K_1K_0}{DD'} = \frac{\lambda}{CC'} = \frac{e}{d};$$

$$\lambda = CC' \cdot \frac{e}{d} = \Delta \ell \cdot \frac{e}{d} \cdot \frac{b}{a}.$$

Відношення  $\frac{\lambda}{\Delta \ell} = \frac{e}{d} \cdot \frac{b}{a}$  являє собою коефіцієнт збільшення тензометра

$K$ . Зазвичай поділка шкали  $B$  становить 1 мм, а розміри  $a, b, d, e$  підбирають так, щоб коефіцієнт збільшення  $K$  був у межах 1000... 1200.

Значення коефіцієнта збільшення тензометра наведено в паспорті приладу. Отже знаючи  $K$ , за різницею відліків  $\lambda$  легко визначити подовження:

$$\Delta \ell = \lambda / K.$$

Для закріплення важельної системи в нерухомому стані тензометр має аретир – фіксуючий важель.

#### Правила роботи з тензометром

1. Перед встановленням приладу на конструкцію металеві поверхні зачищають, на деревині ставлять спеціальні кнопки, бетонні поверхні по можливості згладжують або вирівнюють рідким цементом.
2. Тензометр ставлять на відповідне волокно із закритим аретиром і міцно закріплюють струбциною. При цьому площина тензометра повинна бути перпендикулярною до поверхні зразка.
3. Після встановлення приладу аретир відпускають, а стрілку в положення початкового відліку підводять регулювальним гвинтом. Цим же гвинтом стрілку переводять у протилежний бік шкали, якщо під час випробувань стрілка дійде до кінця шкали й останньої не буде діставати для продовження відліків.
4. Відліки починають з деякого навантаження для того, щоб рухомі частини приладів були налаштовані на переміщення у певному напрямку і вплив вільних рухів був виключений.
5. При відліках слідкують за тим, щоб стрілка та її зображення у дзеркалі шкали співпадали. Відліки беруть з точністю до 1 поділки.

### 1.7. Електротензометрія

Метод електротензометрії полягає в тому, що для виміру лінійних деформацій використовують тензорезистори, які наклеюють на поверхню зразка.

Дротовий тензорезистор (рис. 7) являє собою тонкий дріт, наклеєний кількома петлями на тонку паперову або лакову (плівкову) основу. Зверху він також заклеюється тонким папером або плівкою.

Довжина петлі  $\ell$  є базою тензорезистора. Тензорезистори наклеюють на зразок клеєм (БФ-2, ВЛ-931, БФ-4, ВС-10 та ін.), отже тензорезистор деформується разом з поверхнею зразка.

При деформації дроту тензорезистора змінюється його електричний опір. Це дозволяє визначити деформацію за зміною електричного опору. Для цього



використовують експериментальну залежність, згідно з якою зміна величини опору  $\Delta R$  тензорезистора прямо пропорційна відносній деформації  $\varepsilon$ :

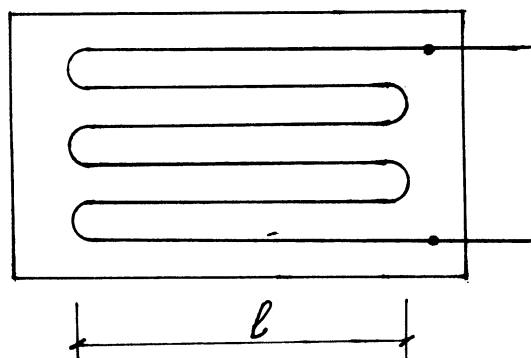


Рис. 7.

$$\Delta R = \varepsilon \cdot R \cdot K,$$

де  $R$  - початковий опір тензорезистора;

$K$  - коефіцієнт тензочутливості, який залежить від матеріалу та бази тензорезистора.

Отже, відносна деформація

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{KR}.$$

Для роботи в лабораторних умовах зручні вимірювальні прилади для визначення деформацій з автоматичною балансування, в яких передбачена можливість підключення разом цілої низки тензорезисторів. Одним з таких приладів є електронний вимірювач деформацій  $AB-I$ . Цей прилад призначений для вимірювання статичної і повільно змінюваних деформацій за допомогою дровових тензорезисторів в одній або в багатьох точках.

Електрична схема  $AB-I$  розрахована на застосування тензорезисторів з опором 70... 400 Ом та коефіцієнтом чутливості від 1,80 до 2,25. Ціна поділки шкали приладу становить  $1 \cdot 10^5$  (при відповідному встановленні масштаба приладу); межа вимірювання відносних деформацій  $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-2}$ .

Вимірювач деформацій  $AB-I$  - електронний автоматичний врівноважений місток з живленням вимірювальної схеми змінним струмом 50 Гц та напругою 4 або 8 В. Робота  $AB-I$  базується на нульовому методі вимірювання опору тензорезисторів.

При вимірюванні деформацій в кількох точках (кількома тензорезисторами) використовують електричний комутатор (багатоточечний перемикач). Комутатор дозволяє послідовно підключати кожний окремий тензорезистор до  $AB-I$ .

Для виключення впливу температури на результати випробувань на конструкції, що випробуються, за межами деформованої зони наклеюють так званий компенсаційний тензодатчик. Схема підключення наведена на рис. 8.

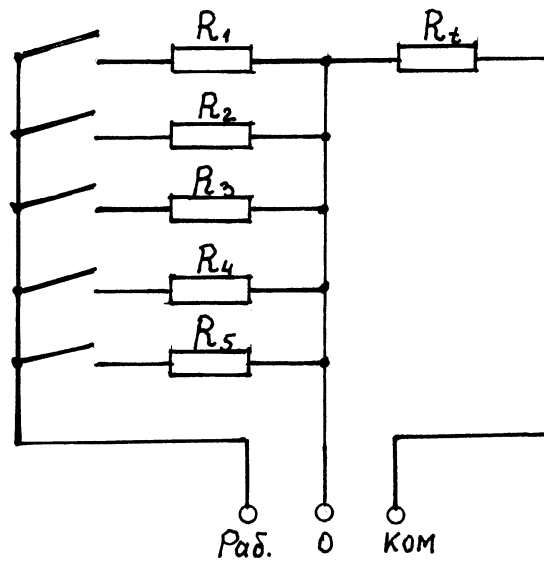


Рис. 8.

### 1.8. Дзеркальний тензометр Мартенса

Дзеркальний тензометр Мартенса призначений для вимірювання кутових деформацій, наприклад, кута поворота перерізу балки, кута закручення стержня та ін.

Тензометр (рис. 9) складається з дзеркальця 1 і зорової трубки 2 з мірною лінійкою 3.

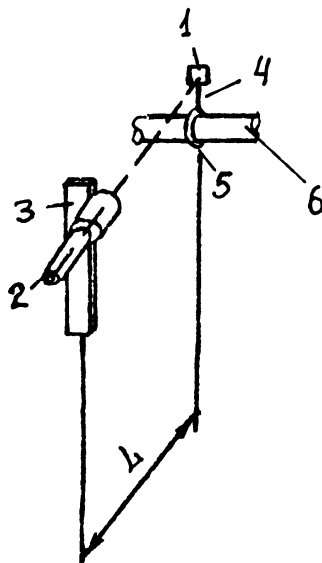


Рис. 9.

Дзеркальце 1 на стержні 4 за допомогою струбцини 5 закріплюється на зразку 6 в тому місці, де необхідно визначити кут повороту. Напроти

дзеркальця на відстані  $L$  ставлять на штативі зорову трубку 2 з мірною лінійкою 3.

Трубку встановлюють так, щоб в ній було видно віддзеркалення шкали лінійки (рис. 10).

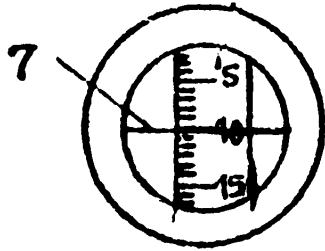


Рис. 10.

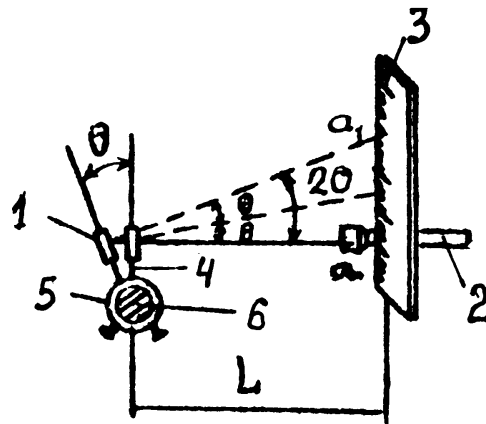


Рис. 11.

Волосок 7 трубки показує початковий відлік  $a$  на лінійці. При повороті перерізу на кут  $\theta$  на такий самий кут повернеться і дзеркальце. При цьому спостерігач проти волоска зорової трубки зробить відлік  $a_1$  на лінійці. Різниця відліків  $a - a_1$  буде пропорційна куту повороту. На схемі (рис. 11) видно, що

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{a - a_1}{L}.$$

Оскільки деформації малі  $\operatorname{tg} 2\theta \approx 2\theta$  і, отже

$$2\theta = \frac{a - a_1}{L}; \quad \theta = \frac{a - a_1}{2L} = \frac{a - a_1}{K},$$

де величину  $K = 2 \cdot L$ , виражену в міліметрах, можна вважати коефіцієнтом збільшення приладу.

### 1.9. Індикатор годинникового типу

Індикатор годинникового типу (прогиномір) (рис. 12,13) призначений для вимірювання лінійних переміщень.

У напрямних 2 корпусу 1 лінійно переміщується штифт 3. Він має рейкову різьбу і зчеплення з шестернею 4, на осі якої нерухомо закріплені стрілка 5 і шестерня 6. На осі шестерні 7, що знаходиться в зачепленні з шестернею 6 закріплена стрілка 8. При переміщенні штифта 3 шестерні 4, 5, 6 разом зі стрілками 5, 8 обертаються.

Індикатор має дві шкали: велику й малу. Велика шкала, вздовж якої рухається стрілка 8, відповідає переміщенням штифта від 0 до 1,0 мм і має 100 поділок. Отже одна поділка відповідає переміщенню штифта на 0,01 мм, а повне обертання стрілки 8 здійснить при переміщенні штифта на 1 мм. На малій шкалі стрілка 5 фіксує кількість повних обертів стрілки 8.

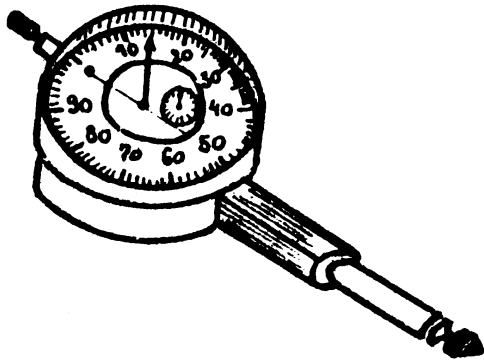


Рис. 12.

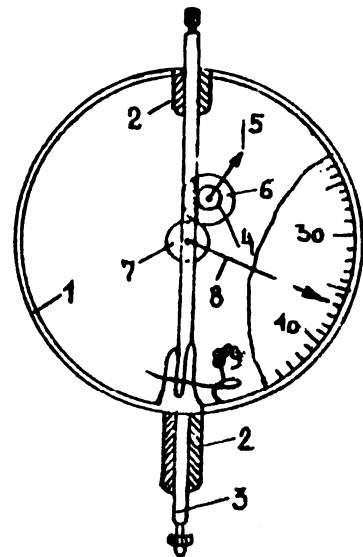


Рис. 13.

При вимірюванні переміщень індикатор встановлюють так, щоб кінець штифта 3 опирався в точку поверхні, переміщення якої вимірюється. У такому положенні з допомогою спеціальних кронштейнів та струбцин корпус індикатора закріплюється нерухомо. Завдяки пружині 9 кінець штифта весь час притиснутий до точки поверхні і при її переміщенні прямує за нею.

### 1.10. Прилади для визначення твердості

*Твердість за Брінелем.* Визначення твердості цим способом виконують з допомогою кулькових інденторів твердістю  $850 \text{ КГс/мм}^2$  одного з трьох діаметрів – 2,5; 5 або 10 мм (рис. 14).

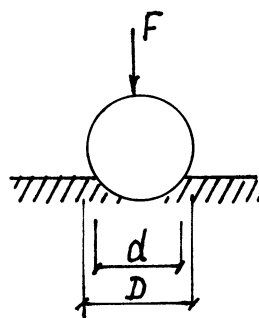


Рис. 14.

Число твердості за Брінелем  $HV$  має розмірність напружень  $\text{КГс/мм}^2$ , але відповідно до стандарту її не пишуть.

Сталеву кульку діаметром  $D$  втискають у зразок, що випробується, на приладі Брінеля (рис. 15). Навантаження від вантажів  $A, B, B, Г$  через важелі 8, 10 передається на приладі на кульку 6 протягом певного часу. Після зняття навантаження заміряють розмір  $d$  відбитка кульки на поверхні зразка. Число

твердості за Брінелем  $HB$  визначають як відношення навантаження  $F$  до площі кульової поверхні відбитка.

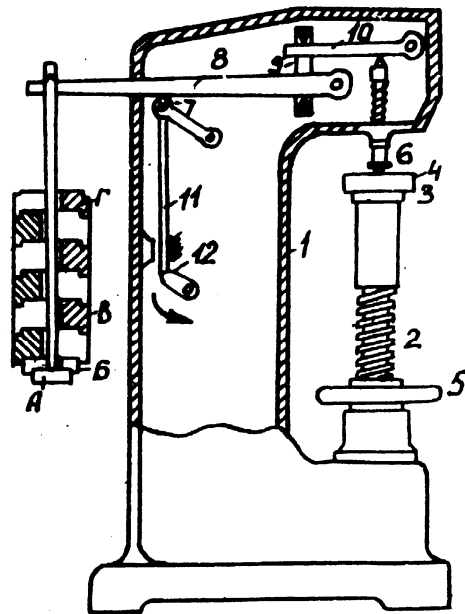


Рис. 15.

*Твердість за Вікерсом.* За розповсюдженням цей метод є другим після методу Брінеля. За цим методом в поверхню зразка втискають алмазний індентор у вигляді чотиригранної піраміди (рис. 16, а) з кутом при вершині  $\alpha = 136^\circ$ .

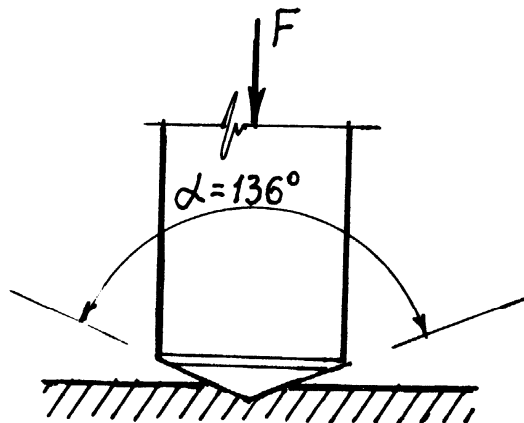


Рис. 16<sup>а</sup>.

Після зняття навантаження  $F$ , що діяло певний час (10... 15 с для чорних і 30 с для кольорових металів), вимірюють діагональ  $d$  відбитка (рис. 16, б) на поверхні зразка. Число твердості за Вікерсом  $HV$  визначають діленням навантаження в КГс на площу бічної поверхні одержаного пірамідального відбитка в  $\text{мм}^2$ .

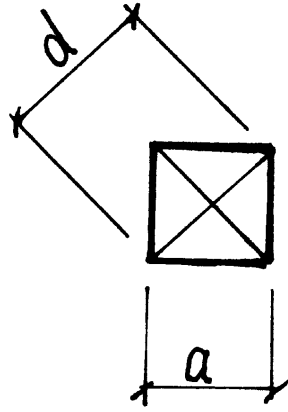


Рис. 16<sup>б</sup>.

Числа *HB* та *HV* близькі за величиною.

*Твердість за Роквелом.* При вимірюванні твердості за Роквелом індентором є алмазний конус з кутом при вершині  $120^0$  і радіусом закруглення 0,2 мм або сталева куляка діаметром 1,5875 мм ( $1/16^{11}$ ), які втискують у зразок під дією двох послідовних навантажень – попереднього  $F_0$  і загального  $F = F_0 + F_1$  ( $F_1$  – основне навантаження).

Індентор на приладі Роквела (рис. 17) втискують в поверхню зразка попереднім навантаженням  $F_0 = 10$  кГс, яке не знімається до кінця випробувань. Під цим навантаженням індентор занурюється у зразок на глибину  $h_1$ . Далі прикладається повне навантаження  $F = F_0 + F_1$  і глибина занурення збільшується до  $h_2$ . Після зняття основного навантаження  $F_1$ , коли на індентор діє тільки попереднє навантаження  $F_0$ , заміряють глибину його занурення  $h_3$ . За останньою й визначається число твердості *HR* за Роквелом.

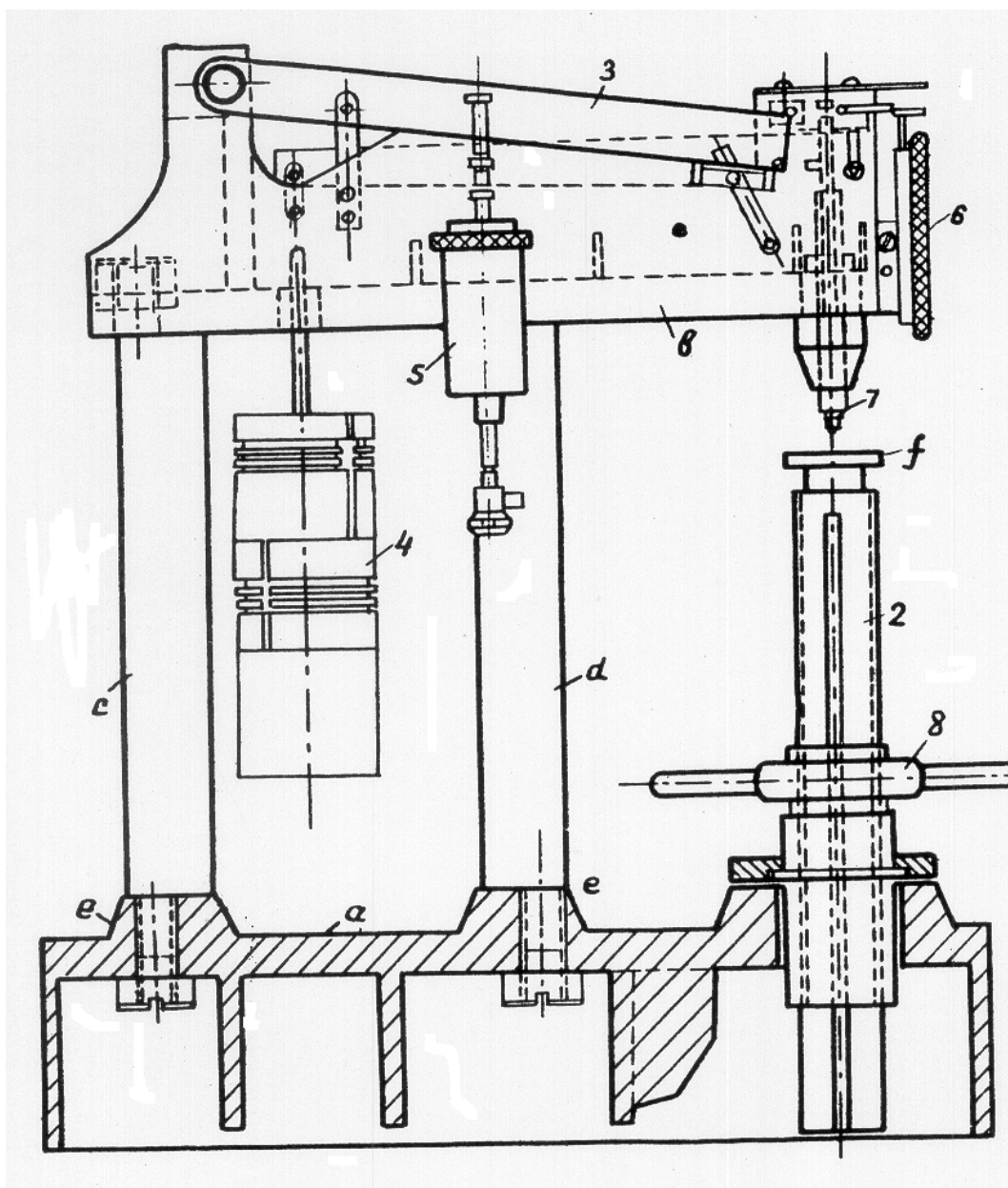


Рис. 17.

## 2. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

### 2.1. Випробування сталевго нормального зразка на розтяг

Мета роботи – одержання діаграми розтягу сталевго зразка, ознайомлення з методикою одержання механічних характеристик матеріалів на прикладі маловуглецевої сталі і визначення марки сталі за одержаними характеристиками міцності й пластичності.

За даними випробувань необхідно визначити:

- межу текучості  $\sigma_m$ ;
- межу міцності розриву  $\sigma_{max}$ ;
- абсолютне подовження розрахункової довжини  $\Delta \ell$ ;
- відносне подовження  $\varepsilon$ ;
- відносне звуження після розриву  $\psi$ ;
- площу діаграми розтягу  $S$ ;
- повну роботу, що витрачена на розрив  $W$ ;
- питому роботу деформації  $w$ ;
- міру заповнення діаграми  $\eta$ ;
- марку сталі.

Машини та прилади для випробувань

Роботу виконують на універсальній випробувальній машині УВМ-50 (п. 1.1). Вимірювання розмірів зразка виконують за допомогою штангенциркуля.

Зразок для випробування

Як показали експерименти, межа міцності матеріалу не залежить від довжини й форми перерізу зразка.

При випробуваннях на розтяг для досягнення порівнюваних між собою результатів використовують нормальні циліндричні зразки семи типів і плоскі зразки двох типів. Тип зразка визначається конструкцією його кінцівок.

У цій роботі використовується циліндричний зразок IV типу (рис. 18).

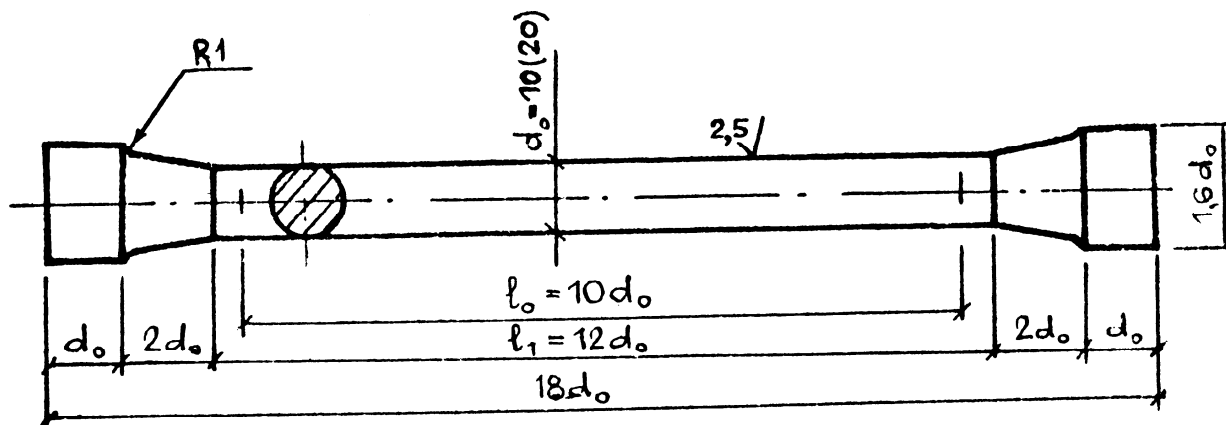


Рис. 18.



Діаметр перерізу такого зразка може бути взятий від 3 до 25 мм.

Розрахункова довжина  $\ell_0$  на зразках помічається рисками. Ця довжина повинна бути меншою, ніж відстань між кінцівками, щоб виключити вплив способу прикладання зовнішніх сил і концентрації напружень в місцях зміни перерізу. Зона цього впливу на підставі принципу Сен-Венана не перевищує меншого розміру перерізу.

#### Основні відомості з теорії

Особливості поведінки зразка при випробуванні на розтяг наочно ілюструються діаграмою розтягу – графіком залежності між навантаженням  $F$  та абсолютним подовженням  $\Delta\ell$ . Для маловуглецевої сталі вона має вигляд, наведений на рис. 19.

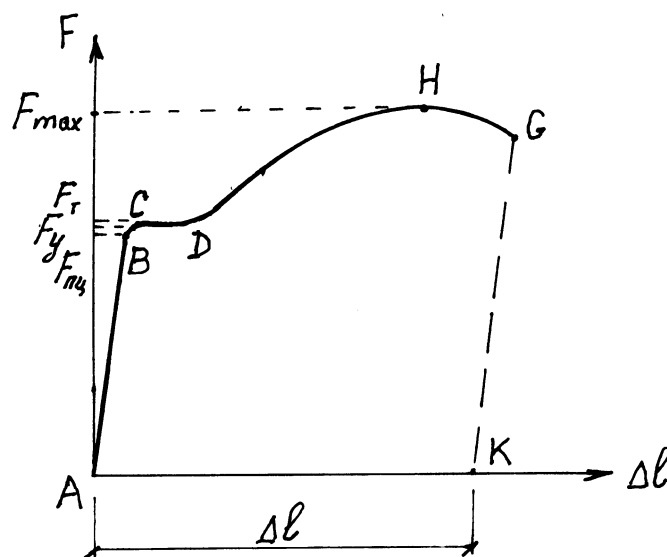


Рис. 19.

На цій діаграмі можна виокремити три ділянки: лінійна AB; горизонтальна CD та нелінійна DHG.

На ділянці AB подовження  $\Delta\ell$  пропорційне навантаженню  $F$ , тобто дійсний закон Гука. Величина  $F_m$  визначає навантаження, що відповідає межі пропорційності. Дуже близьке до нього значення  $F_y$ , яке визначає межу пружної роботи матеріалу.

На ділянці CD подовження  $\Delta\ell$  зростають при незмінному навантаженні  $F_m$ . Таке явище, характерне для пластичних матеріалів, називається текучістю, а  $F_m$  – навантаження, що відповідає межі текучості матеріалу.

Коли зона текучості минає, навантаження знову зростає до  $F_{max}$ , після чого стрімко падає до миті розриву зразка (т. G).  $F_{max}$  – навантаження, що відповідає межі міцності матеріалу (тимчасовому опору).

Діаграма розтягу будується для даного зразка і її масштаб залежить від розмірів останнього. Тому на основі цієї діаграми будують діаграму напружень – залежність між напруженнями  $\sigma = \frac{F}{A_0}$  та відносним подовженням  $\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0}$ .

Ця діаграма є характеристикою матеріалу безвідносно до розмірів зразка. На діаграмі напружень зберігаються всі характерні точки діаграми розтягу.

Падіння навантаження після досягнення  $F_{max}$  обумовлене тим, що в цей час на зразку утворюється місцеве звуження – так звана шийка (рис. 20). В результаті цього несуча здатність зразка знижується. На рис. 20  $d$  – діаметр шийки.

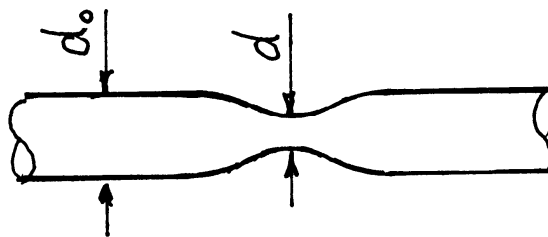


Рис. 20.

#### Послідовність виконання роботи

За допомогою штангенциркуля вимірюють діаметр  $d_0$  та розрахункову довжину  $\ell_0$  зразка, після чого закладають його в зачіпки машини УВМ-50.

Перед початком випробувань проводять попередній натяг, щоб виключити вплив люфтів та сковзання зразка в зачіпках. Далі виставляють на барабан діаграмного апарата олівець і створюють зростаюче навантаження  $F$ , доводячи зразок до розриву.

Упродовж експерименту на силовій шкалі машини відзначають навантаження  $F_m$ , що відповідає межі текучості та  $F_{max}$ . Навантаження  $F_m$  відповідає тій стадії навантаження, коли при зупиненні збільшення зусилля відзначається зростання деформацій. Значення  $F_m$  та  $F_{max}$  одержують також за діаграмою, записаною на машині УВМ-50. На діаграмі вимірюють її площу  $S$ .

Після розриву зразка його частини виймають з машини і вимірюють довжину розрахункової частини  $\ell$  та діаметр зразка в зоні розриву – діаметр шийки  $d$ .

Далі за одержаними даними випробувань виконують обчислення:

- площа перерізу зразка до випробувань

$$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4};$$

- площа шийки зразка (в місці розриву)

$$A = \frac{\pi d^2}{4};$$

- межа текучості матеріалу  $\sigma_m = F_m / A_0$ ;
- межа міцності  $\sigma_{max} = F_{max} / A_0$ ;
- абсолютне подовження  $\Delta\ell = \ell - \ell_0$  ( $\ell$  – довжина розрахункової частини зразка після розриву);
- відносне подовження  $\varepsilon = \Delta\ell / \ell_0$ ;
- коефіцієнт звуження шийки  $\psi = \frac{A_0 - A}{A_0}$ ;
- робота, витрачена на розрив зразка  $W = S \cdot m \cdot n$  ( $S$  – площа діаграми розтягу,  $m$  та  $n$  – масштаби сил та переміщень, які наведені в паспорті машини);
- питома робота деформації  $w = \frac{W}{A_0 \ell_0}$ ;
- межа заповнення діаграми  $\eta = \frac{W}{F_{max}(\ell - \ell_0)}$ .

Маючи межу міцності, відносне подовження і межу текучості, визначають марку сталі зразка (див. табл. 1, Додатку ).

#### Контрольні запитання

1. Яка мета роботи?
2. Які параметри характеризують міцність матеріалу?
3. Які параметри характеризують пластичність матеріалу?
4. Назвіть характерні точки діаграми розтягу?
5. Які деформації мають місце в процесі деформації зразка до руйнування?
6. Як за даними випробувань визначають марку матеріалу?
7. Яке призначення має машина УВМ-50?
8. Який принцип роботи машини УВМ-50?

## 2.2. Визначення модуля пружності та межі пропорційності сталі при розтягу

Мета роботи – визначення модуля пружності та межі пропорційності сталі при розтягу.

Машина та прилади для випробувань

Випробування можна проводити на будь-якій розривній машині, наприклад на УВМ-50 (п. 1.1).

Для вимірювання деформацій застосовують механічний тензометр МК-3 або важельний тензометр Гугенберґера (п. 1.6).

Поширеним є також метод визначення деформацій за допомогою тензорезисторів (п. 1.7).

#### Зразок для випробувань

У роботі використовують нормальний циліндричний зразок типу IV (див. лабораторну роботу 2.1).

#### Основні відомості з теорії

Як відомо, при роботі матеріалу в пружній стадії він підпорядковується закону Гука так, що однаковим приростам  $\Delta F$  навантаження відповідають однакові прирости  $\Delta \ell$  подовження зразка.

Ця пропорційність між навантаженнями і деформаціями при деякому значенні  $F_{mц}$  навантаження порушується. Деформації, як правило, починають зростати швидше, ніж навантаження. Напруження  $\sigma_{mц}$ , при якому порушується лінійна залежність між силою і деформацією, називається межею пропорційності.

Для визначення  $F_{mц}$  зразок завантажують поступово на випробувальній машині рівними частками  $\Delta F$ . При кожному значенні навантаження приладом для заміру деформацій визначають збільшення довжини розрахункової ділянки зразка (бази вимірювального приладу). Звичайно, в межах пропорційності кожній частці навантаження відповідатиме збільшення цієї ділянки на однакову величину  $\delta \Delta \ell$  (рис. 21). Фактично через похибки експерименту ці величини  $\delta \Delta \ell$  будуть відрізнятися на малі частки міліметра.

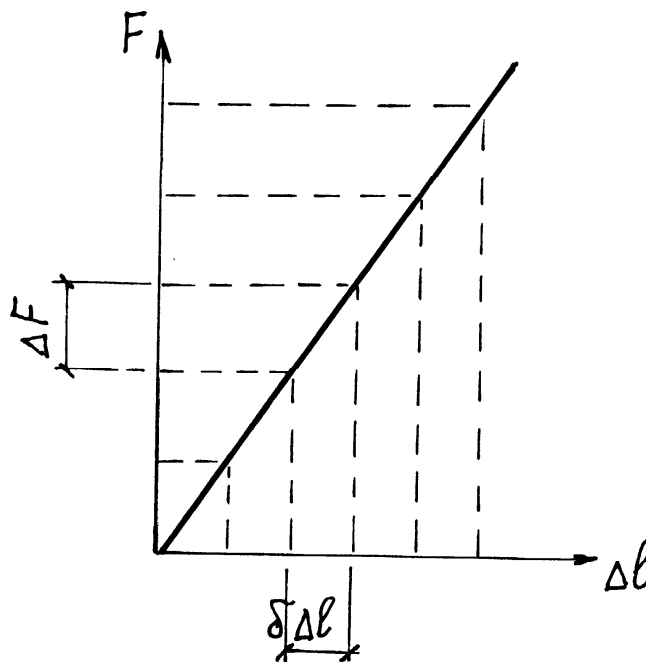


Рис. 21.

Після досягнення навантаження значення  $F_{m\ell}$  пропорційність між навантаженнями та подовженнями порушується і тим самим часткам  $\Delta F$  будуть відповідати збільшені прирости подовжень  $\delta\Delta\ell$ . За відхиленнями від пропорційності визначають  $F_{m\ell}$ .

Модуль пружності  $E$ , що характеризує пружні якості матеріалу, визначають з формули для абсолютного подовження:

$$E = \frac{F\ell}{A_0\Delta\ell}.$$

У цій формулі  $F$  - навантаження в межах пропорційності;

$A_0$  - площа перерізу зразка;

$\ell$  - база вимірювального приладу;

$\Delta\ell$  - подовження бази, що відповідає навантаженню  $F$ .

Зрозуміло, що замість абсолютного значення  $F$  для визначення модуля пружності можна взяти приріст навантаження  $\Delta F$ . Тоді замість  $\Delta\ell$  необхідно брати приріст подовження  $\delta\Delta\ell$ :

$$E = \frac{\Delta F \cdot \ell}{A_0\delta\Delta\ell}.$$

#### Послідовність виконання роботи

Перед початком випробувань вимірюють зразок. Згідно з обраним типом тензометра визначають розрахункову довжину зразка (базу тензометра). Ці значення заносять у журнал спостережень.

Далі зразок закріплюють у зачіпках машини і встановлюють по обидва боки зразка тензометри. Перед випробуванням дають незначне навантаження (1 кН) для того, щоб обтиснути кінцівки зразка й усунути нещільності. При цьому навантаженні знімають перші відліки  $A_1$  на правому й  $A_2$  на лівому тензометрах.

Випробування проводять, збільшуючи навантаження однаковими частками  $\Delta F = 10$  кН. Експеримент закінчують тоді, коли матеріал зразка починає текти, що показує різке зростання відліків на тензометрах без збільшення навантаження.

Обробку результатів випробувань починають з визначення навантаження  $F_{m\ell}$ . Для цього підсумовують відліки  $A_1$  та  $A_2$  по лівому й правому тензометрах для кожного навантаження, а потім обчислюють прирости  $\Delta(A_1 + A_2)$  цих сум. Навантаження, при якому ці прирости різко збільшуються, вважають  $F_{m\ell}$ .

Межу пропорційності обчислюють за формулою

$$\sigma_{m\ell} = \frac{F_{m\ell}}{A_0}.$$

Обчислення модуля пружності виконують через середній приріст деформацій

$$\Delta \ell_{cp} = \frac{\Sigma \Delta(A_1 + A_2)}{2n} \cdot \frac{K}{10000}, \text{ см},$$

де  $n$  - кількість приростів сум відліків, що враховані при визначенні середнього відліку;

$K$  - ціна поділки тензометра.

Модуль пружності при розтягу

$$E = \frac{\Delta F \cdot \ell}{A_0 \Delta \ell_{cp}}.$$

#### Контрольні запитання

1. Що таке модуль пружності першого роду?
2. В яких розрахунках потрібний модуль пружності?
3. Яка фізична суть модуля пружності?
4. Для чого призначені тензометри?
5. Чому при визначенні  $E$  напруження не повинні перебільшувати межу пропорційності?
6. Що є базою тензометра?

### 2.3. Випробування сталі на стиск

Мета роботи: вивчення властивостей пластичних матеріалів при тиску і визначення їхніх механічних характеристик.

Випробувальна машина. Випробування проводять на випробувальній машині УВМ-50 (п. 1.1).

Зразок для випробувань

Для випробування використовують зразок у вигляді циліндра з відношенням висоти до діаметра  $\frac{h}{d} = 1 \dots 3$ . Стиск проводять центральними навантаженнями паралельно осі зразка. На міцність та характер деформацій впливають сили тертя, що діють у площинах контакту між торцями зразка і опорними плитами машини. Якщо змастити торці зразка для зменшення сил тертя, величина межі міцності виявляється меншою, ніж при відсутності мастила. Щоб одержати порівнювані результати, наявність чи відсутність змащування необхідно зазначати. Сили тертя протидіють деформації зразка у поперечному напрямку. Вплив цих сил зменшується при віддаленні від торців до середини. Через це зразок при стиску стає бочкоподібним (рис. 22).

Враховуючи вплив сил тертя на результати експерименту, не рекомендується вживати дуже короткі зразки. Не слід застосовувати також довгі зразки, оскільки внаслідок хоча незначних ексцентриситетів прикладання навантаження крім стиску з'явиться згин. При збільшенні довжини зразка зростає і вплив згину.

### Основні відомості з теорії

При стиску зразок покоротшується і розширюється замість подовження та звуження при розтягу. Всі механічні характеристики матеріалів зберігають ті самі визначення та позначення, що й при розтягу.

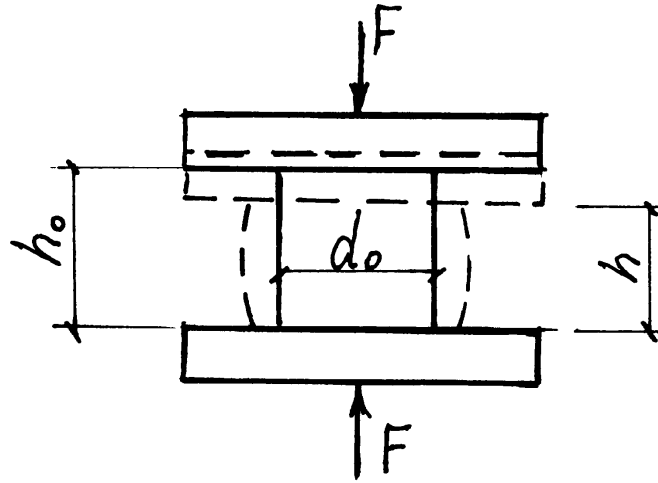


Рис. 22.

Отже, відносне покоротшання

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0},$$

де  $h_0$  та  $h$  - висота зразка відповідно до та після експерименту.

Відносне поперечне розширення

$$\psi = \frac{A - A_0}{A_0},$$

де  $A$  та  $A_0$  - площа перерізу зразка відповідно після та до експерименту.

З діаграми стиску м'якої сталі (рис. 23) видно, що в початковому періоді

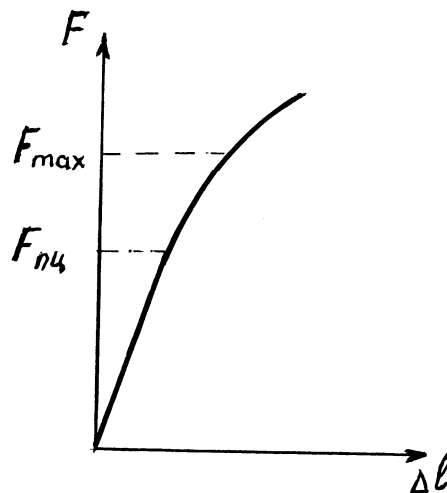


Рис. 23.

завантаження, як при розтягу, має місце пропорційність між силою та деформацією. Після досягнення навантаження, що відповідає межі пропорційності, лінійна залежність порушується: деформації зростають швидше, ніж навантаження. При подальшому збільшенні стискуючої сили зростання деформацій поступово стає повільним за рахунок збільшення перерізу зразка. Оскільки зразок під дією зростаючого навантаження поступово розплющується, визначити руйнуюче навантаження неможливо. Тому випробування переривають при деякому навантаженні  $F_{max}$ , обмежуючись вивченням поведінки та характеру деформацій пластичної сталі при стиску.

Випробування на стиск для пластичного матеріалу є додатком до випробувань на розтяг.

Визначення напружень за формулою

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_0}$$

дає дуже умовні величини через неоднаковість перерізів зразка вздовж висоти.

Межу пропорційності при стиску можна визначити так само, як і при розтягу:

$$\sigma_{nc} = \frac{F_{nc}}{A_0}.$$

#### Послідовність виконання роботи

Перед початком випробувань заміряють діаметр перерізу та висоту сталевго зразка.

Зразок розміщують між стискуючими площинами випробувальної машини та проводять його поступово зростаюче навантаження. Одночасно спостерігають деформації зразка. Коли стискуюча сила досягає 350... 400 кН, випробування переривають.

Вимірюють діаметр та висоту зразка після деформації.

Обчислюють нормальне напруження сталі при максимальному навантаженні.

Результати замірів та обчислень заносять у журнал спостережень.

#### Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Яка форма перерізу зразка для випробувань?
3. Яке відношення висоти до діаметру перерізу повинен мати зразок?
4. Який вигляд має діаграма стиску?
5. Чи впливають сили тертя між торцями зразка та опорними плитами на форму деформування зразка і результати випробувань?
6. За якою формулою обчислюють межу пропорційності сталі при стиску?
7. Яка розмірність умовної межі міцності й межі пропорційності сталі?
8. Якої форми набуває зразок при стиску?



9. За якими формулами визначають відносне покоротшання та відносне розширення зразка?

## 2.4. Випробування чавуна на стиск

Мета роботи: вивчення властивостей крихких матеріалів при стиску та визначення межі міцності чавуна.

### Випробувальна машина

Експеримент виконують на випробувальній машині УВМ-50.

### Зразок для випробувань

Випробування чавуна на стиск звичайно проводять на зразках циліндричної форми з відношенням висоти до діаметра у межах  $h/d = 1...2$  (рис. 24).

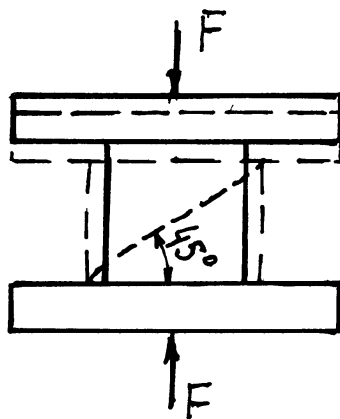


Рис. 24.

Для таких крихких матеріалів, як камінь та бетон звичайно зразок беруть у вигляді куба.

### Основні відомості з теорії

Крихкі матеріали (чавун, камінь, бетон та ін.) на стиск працюють значно краще, ніж на розтяг, тому вони використовуються саме в стиснутих елементах споруд. Отже випробування на стиск для таких матеріалів є основними.

На початку дії навантаження діаграма стиску чавунного зразка дуже близька до прямої (рис. 25). Відхилення її від осі  $F$  мале. Точна пропорційність між навантаженнями та покоротшаннями відсутня, тобто закон Гука в цьому випадку не діє. Однак в межах тих напружень, при яких матеріал звичайно застосовується в конструкціях, відхилення від закону Гука незначне і на практиці ним нехтують.

При збільшенні навантаження діаграма суттєво викривляється, зростання деформацій випереджає зростання навантаження. Руйнування зразка відбувається миттєво при достатньо значному навантаженні  $F_{max}$ . Руйнування відбувається вздовж похилих площин, кут яких з віссю зразка складає  $45... 50^\circ$ . Цей кут нахилу площин руйнування близький до кута нахилу найбільших дотичних напружень.

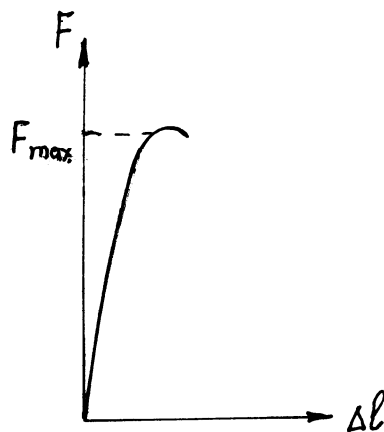


Рис. 25.

Стиснутий зразок змінює попередню циліндричну форму на бочкоподібну, що свідчить про наявність невеликих пластичних деформацій.

Межу міцності чавуна визначають за відомою формулою

$$\sigma_{max} = F_{max} / A_0.$$

Відзначимо, що діаграми стиску і розтягу крихких матеріалів мають однакову форму, але межа міцності при стиску (500... 1000 МПа) в декілька разів перевищує межу міцності при розтягу (210... 320 МПа).

#### Послідовність виконання роботи

Після вимірювання зразок встановлюють між стискуючими площинами машини і проводять його стиск до руйнування. Значення навантаження  $F_{max}$ , при якому відбулося руйнування, заносять в журнал спостережень.

Обчислюють межу міцності чавуна на стиск і за табл. 2 Додатку визначають марку чавуна.

#### Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Яка форма перерізу зразка для випробувань?
3. Який вигляд має діаграма стиску чавуна?
4. Для яких матеріалів випробування на стиск має важливе практичне значення?
5. Як відрізняються діаграми стиску чавуна та сталі?
6. Чому руйнування зразка відбувається вздовж площин, нахилених під кутом  $45^\circ$  до його осі?
7. За якою формулою визначають межу міцності чавуна при стиску?

## **2.5. Випробування деревини на стиск**

Мета роботи: вивчення властивостей деревини при стиску її вздовж та поперек волокон, визначення межі міцності.

### Випробувальна машина

Експеримент виконують на випробувальній машині УВМ-50.

### Зразок для випробувань

Для випробувань деревини на стиск у цій роботі беремо кубики з сосни розміром 50х50х50 мм.

### Основні відомості з теорії

Однією з механічних характеристик деревини є опір її стиску.

Величина опору деревини перш за все залежить від того, як спрямоване навантаження відносно напрямку волокон: уздовж (рис. 26) або поперек (рис. 27).

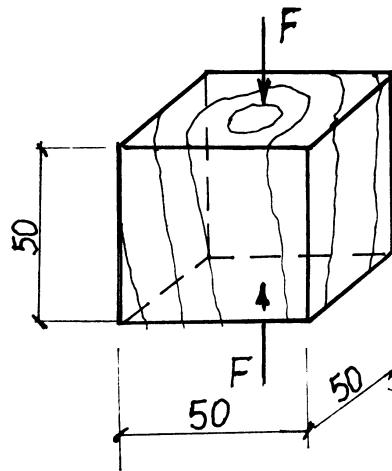


Рис. 26.

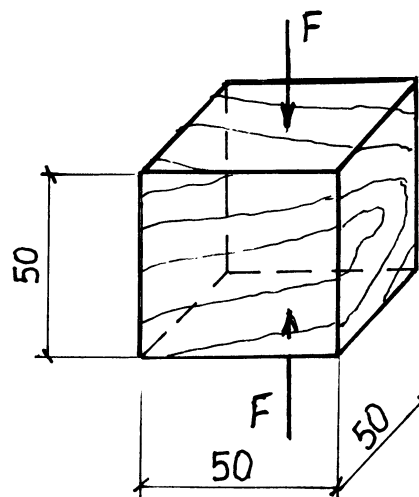


Рис. 27.

Різниця в міцності пояснюється тим, що деревина фактично складається з пластинок різної міцності. Ці пластинки утворюються з весняних та осінніх шарів деревини різної щільності.

При стиску вздовж волокон руйнування відбувається після вичерпання міцності твердих пластинок при порівняно невеликих деформаціях. Як свідчить

діаграма стиску (рис. 28), між навантаженнями та деформацією спостерігається пропорційність майже до руйнування.

Випробування проводять до руйнування зразка. Максимальне зусилля визначають з діаграми стиску або відраховують на шкалі силовимірювача випробувальної машини.

При випробуванні на стиск поперек волокон (рис. 27) початок руйнування зразка помітити важко, оскільки при цьому стрілка манометра затримується на дуже короткий час. Далі деревина ущільнюється, її опір збільшується, навантаження зростає (рис. 29). Тому за максимальне навантаження приймають або силу  $F_{пц}$ , що відповідає межі пропорційності,

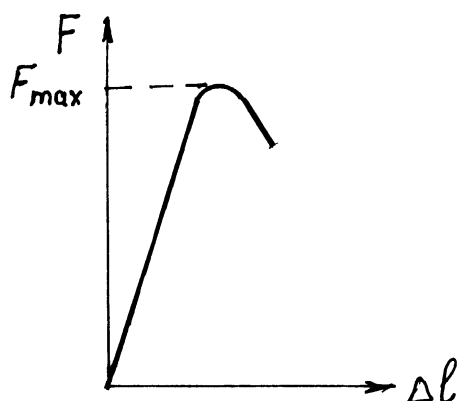


Рис. 28.

або близьку до неї  $F_{max}$ . Остання відповідає навантаженню в час припинення експерименту, коли висота зразка при стиску зменшується приблизно на 1/3 від свого початкового значення. При стиску поперек волокон руйнуються м'які шари зразка.

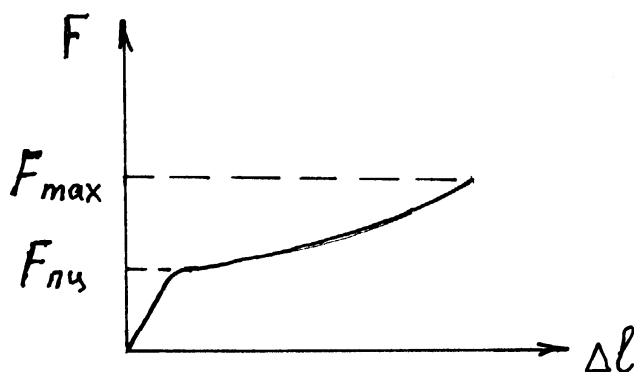


Рис. 29.

У результаті випробувань визначається межа міцності деревини (сосна) при стиску її вздовж та поперек волокон за формулою

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_0}.$$

Межа міцності деревини при стиску вздовж волокон приблизно в 10 разів більше межі міцності поперек волокон.

Міцність деревини залежить від її вологості. З підвищенням вологості опір деревини зменшується.

#### Послідовність виконання роботи

Після вимірювання зразок розташовують між стискуючими площинами випробувальної машини.

Проводять стиск зразка зростаючим навантаженням, одночасно спостерігають за станом зразка.

Після руйнування зразка фіксують максимальне значення навантаження  $F_{max}$ , вивільняють зразок.

У журналі спостережень виконують обчислення меж міцності деревини при стиску її вздовж та поперек волокон.

#### Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Які види випробувань проводять при стиску деревини?
3. Як впливає вологість деревини на опір її стиску?
4. Коли переривають випробування деревини на стиск уздовж і поперек волокон?
5. За якою формулою обчислюють межу міцності деревини при стиску?
6. Як відрізняються одна від одної діаграми стиску вздовж і поперек волокон?
7. Яка з меж міцності деревини при стиску більше (вздовж чи поперек волокон)?

## **2.6. Випробування деревини на скіл**

Мета роботи: вивчення межі міцності деревини на скіл уздовж волокон.

Машина та прилади для випробувань

Випробування виконують на випробувальній машині УВМ-50 або ін. (п. 1.1, 1.2).

Зразок для випробувань

Для випробувань на скіл застосовують зразок, наведений на рис. 30. Площина сколу зразка повинна бути дотична до річних кілець деревини. Зразок закладають у спеціальний пристрій (рис. 31) так, щоб виступ зразка був розташований напроти леза.

### Основні відомості з теорії

При певній величині тиску  $F_{max}$  опори випробувальної машини на лезо 3 (рис. 31), закріплене гвинтом 2, станеться скіл виступа 1 зразка по площині  $abcd$  (рис. 30). Межа міцності на скіл визначається за формулою

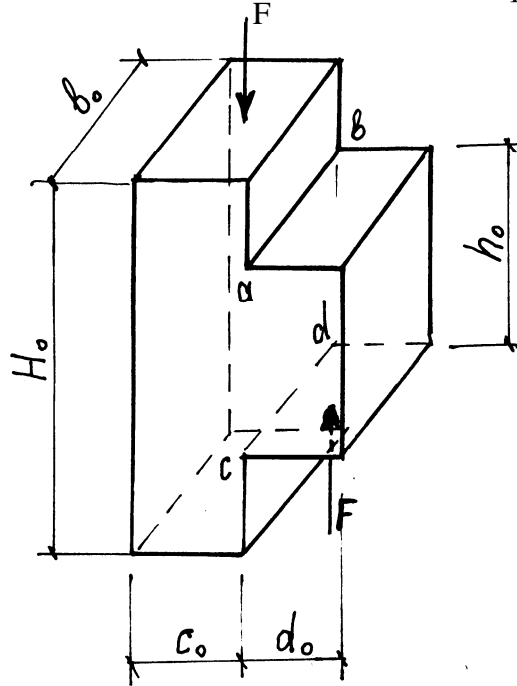


Рис. 30.

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{A_0},$$

де  $A_0$  - площа сколу зразка (площа  $abcd$ ).

### Послідовність виконання роботи

Вимірявши розміри зразка, визначають площу сколу

$$A_0 = h_0 \cdot b_0.$$

Пристрій зі зразком встановлюють між стискуючими площинами випробувальної машини.

Поступово збільшуючи тиск, відзначають момент падіння значення навантаження. Найбільше досягнуте до цього падіння навантаження  $F_{max}$  відповідає миті сколу зразка. За наведеною вище формулою визначають межу міцності  $\sigma_c$  деревини на скіл.

### Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Як розташована площина сколу відносно річних кілець деревини?
3. Як визначають площу сколу зразка?
4. Як фіксується явище сколу деревини?
5. Як визначають межу міцності деревини на скіл?

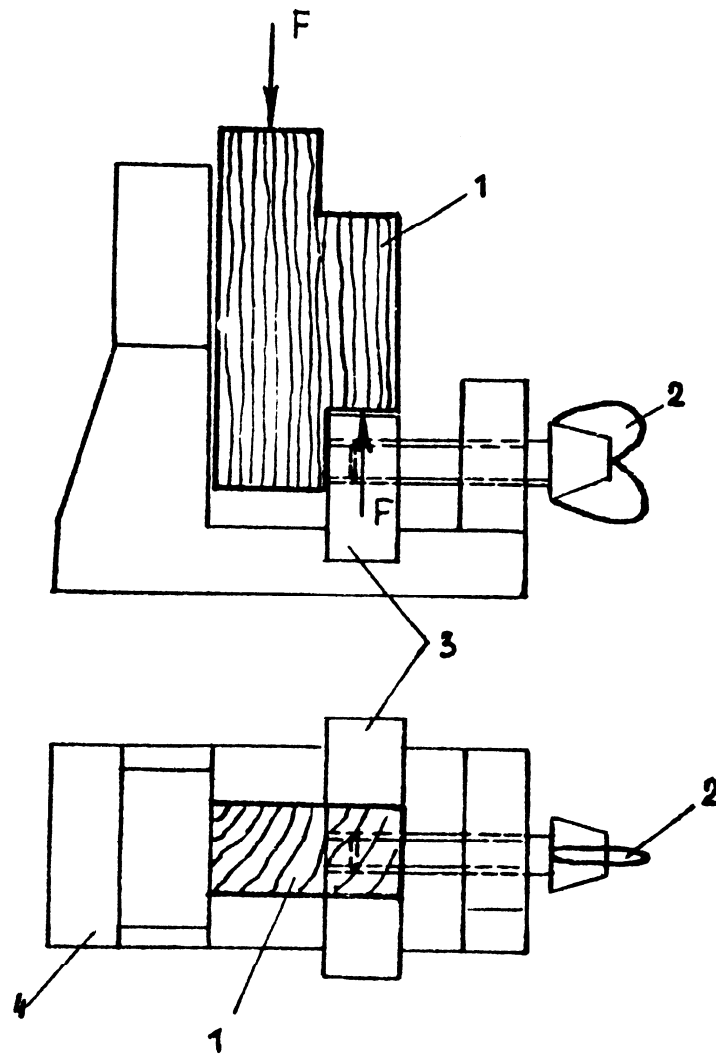


Рис. 31.

## 2.7. Випробування пластмаси на розтяг

Мета роботи: ознайомлення з особливостями випробувань пластичних мас при розтягу, визначення меж міцності та текучості, відносного подовження.

### Випробувальна машина та прилади

Випробування пластмас проводимо на машинах, які при розтягу забезпечують вимірювання навантаження з похибкою не більше 1% від вимірюваної величини. Зачіпки машини повинні забезпечувати надійне закріплення зразка та співпадіння його поздовжньої осі з напрямком розтягу.

Для вимірювання деформацій використовують:

- прилади, що закріплюються безпосередньо на зразках – механічні, електричні та іншого типу тензометри (п. 1.6, 1.7);
- прилади з оптичною або іншою системою вимірів, не закріплені на зразку.

### Зразки для випробувань

Для випробувань застосовують зразки трьох типів (рис. 32). Зразки типу 1 використовують для випробування пластмас з високим відносним подовженням при розриві (поліетилен, пластифікований полівініл-хлорид та ін.).

На зразках типу 2 випробують більшість термоактивних, термопластичних матеріалів.

#### Основні відомості з теорії

У різних видів пластмас діаграми розтягу можуть бути зовсім несхожими. Випробування пластмас на розтяг проводять, визначаючи:

- 1) руйнуюче напруження  $\sigma_{max}$  та межу текучості  $\sigma_m$ ;
- 2) відносне подовження при розриві  $\varepsilon_r$  та відносне подовження  $\varepsilon_m$ , що відповідає межі текучості.

#### Послідовність виконання роботи

Навантаження, що визначає межу текучості, відповідає зростанню деформацій, що відбуваються без помітного збільшення навантаження або початку утворення на зразку місцевого звуження – шийки. Якщо матеріал не має межі текучості, визначають умовну межу текучості, що відповідає помітному зростанню деформацій.

Діаграма розтягу дає наочне уявлення про процес деформування.

При досягненні межі текучості тензометр необхідно зняти, щоб під час руйнування зразка не пошкодити його.

Після руйнування зразка обидві його частини виймають з машини, з'єднують їх і заміряють залишкове подовження. Необхідно враховувати лише результати, одержані на зразках, що зруйнувалися в межах розрахункової частини.

За одержаними даними обчислюють межу міцності та текучості, відносне подовження зразка.

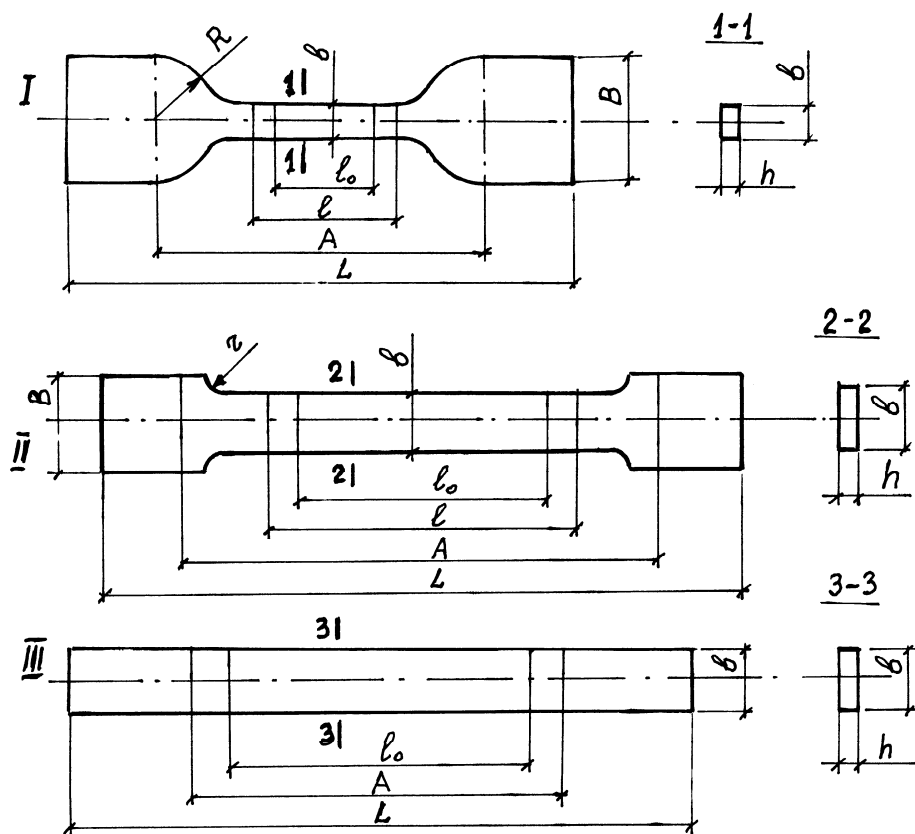


Рис. 32.



### Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Який характер має діаграма розтягу пластмаси?
3. Які механічні характеристики визначають при розтягу пластмаси?

## 2.8. Визначення модуля поздовжньої пружності пластмас

Мета роботи: визначення статичного модуля пружності пластичних мас.

Випробувальна машина та прилади

Випробування виконують на машинах, які при розтягу забезпечують вимірювання навантаження з похибкою не більше 1%.

Для вимірювання деформацій використовують механічні або електричні тензометри (п. 1.6, 1.7).

Зразок для випробувань

Для випробувань використовують зразки трьох типів (рис. 32).

Основні відомості з теорії

У реальних твердих тілах завжди має місце відхилення від закону Гука, згідно з яким напруження в пружному тілі пропорційне деформації і не залежить від швидкості навантаження.

Статичний модуль пружності визначають при постійній швидкості деформації (подовження) або напруження (навантаження).

Статичний модуль поздовжньої пружності визначають за ДСТ, що поширюється на пластичні маси з модулем пружності не нижче 300 МПа за формулою

$$E = \frac{\Delta F \cdot \ell}{\Delta \ell_{cp} \cdot A_0},$$

де  $\Delta \ell_{cp}$  - усереднене подовження, що відповідає постійному прирощенню навантаження  $\Delta F$ ;

$A_0$  - первісна площа перерізу зразка;

$\ell$  - розрахункова довжина (база тензометра).

Деформації за тензометром відліковують не менше, ніж при двох навантаженнях: початковому  $F_0$ , що дорівнює приблизно 2% від руйнуючого  $F_p$ , і  $F_{max}$ , що складає 8... 10%  $F_p$ . При цьому швидкість навантаження повинна становити 0,25... 0,33 МПа/с для матеріалів, міцність яких на розтяг більше ніж 100 МПа.

Кожний зразок завантажують – розвантажують шість разів, заміряючи подовження  $\Delta \ell$  при  $\Delta F = F_{max} - F_0$ .

Послідовність виконання роботи

Після вимірювання перерізу зразка закріплюють його в зачіпках машини так, щоб поздовжня вісь співпадала з лінією дії навантаження і виключалось просковзання. На робочу частину зразка ставлять тензометр так, щоб його база була розташована вертикально посередині ширини зразка.

Після кожного завантаження – розвантаження перевіряють розташування тензометра, щоб його відлік був нульовим.

Обчислюють модуль пружності за трьома останніми вимірами.

Результати випробувань заносять в журнал спостережень.

#### Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Чому швидкість завантаження повинна обмежуватись?

## 2.9. Випробування пластмас на стиск

Мета роботи: визначення межі міцності пластмас при стиску.

Випробувальна машина та прилади

Випробування виконують на машині, яка забезпечує відлік навантаження з похибкою не більше 1%, та дозволяє записувати діаграму стиску.

Зразки для випробувань

Для випробувань використовують зразки довільного перерізу, достатньо короткі, щоб виключити вплив можливого ексцентриситету прикладання навантаження.

Основні відомості з теорії

Основними характеристиками, що визначають роботу пластмас на стиск, є:

- руйнуюче напруження  $\sigma_{pc}$ , що відповідає навантаженню  $F_{pc}$  при руйнуванні зразка або при появі тріщин;
- напруження  $\sigma_{25}$ , що відповідає навантаженню при досягненні збільшення площі перерізу зразка 25% від початкової площі  $A_0$ . Цей показник – умовна межа міцності - використовують для характеристики матеріалів, що не руйнуються при стиску;
- відносна деформація  $\varepsilon_{pc}$ , що відповідає руйнуючому навантаженню  $F_{pc}$ :

$$\varepsilon_{p.c.} = \frac{\Delta \ell}{\ell_0}.$$

Для пластмас з різко окресленими в'язко-текучими властивостями визначають додаткові характеристики:

- межу текучості  $\sigma_{m.c.}$  при стиску, що відповідає навантаженню  $F_{m.c.}$ , при якому починається зростання деформацій без збільшення навантаження;
- умовну (змішану) межу текучості  $\sigma_{y.m.c.}$  при стиску, що відповідає навантаженню  $F_{y.m.c.}$  (рис. 33);
- відносну деформацію стиску  $\varepsilon_{m.c.}$ , що вимірюється при досягненні навантаження, при якому розраховується межа текучості.

### Послідовність виконання роботи

Випробування проводять із записом діаграми стиску. Для крихкої пластмаси на діаграмі при певному навантаженні з'являються невеликі виступи, що свідчить про появу тріщин.

Після руйнування зразка машину зупиняють, виймають зразок та вимірюють його довжину.

Якщо зразок не зруйнований, значення руйнуючого навантаження і, відповідно, руйнуючого напруження визначають за діаграмою стиску для відносної деформації, що становить 25% від первісної площі перерізу.

За даними випробувань обчислюють  $\sigma_{p.c.}$ ,  $\sigma_{25}$ ,  $\epsilon_{pc}$  і заносять їх в журнал спостережень.

В обраному масштабі відображають діаграму стиску.

### Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. В яких координатах будують діаграму стику?
3. Які характеристики визначають при стиску пластмас?

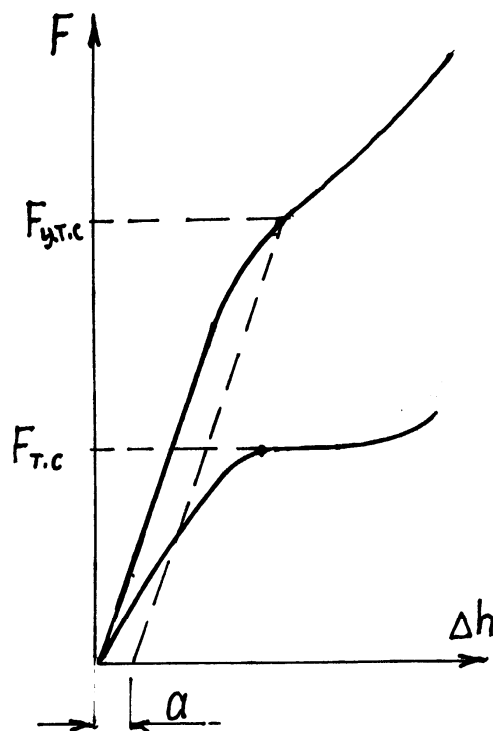


Рис. 33.

## 2.10. Випробування склопластика АГ-4С на розтяг

Мета роботи: дослідження властивостей анізотропного матеріалу при розтягу з визначенням межі міцності, модуля пружності, межі пропорційності.

### Випробувальна машина та прилади

Випробування проводять на машинах для розтягу, зокрема на УВМ-50 (п. 1.1, 1.2).

Для вимірювання деформацій використовують механічні або електричні тензометри (п. 1.6, 1.7).

### Зразок для випробувань

Для випробувань застосовують зразки, виготовлені безпосереднім пресуванням при температурі  $155 \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Перед пресуванням з прес-матеріалу АГ-4 марок С та НС вирізують заготовки відповідної довжини в напрямку розташування скляних волокон. Зразки після пресування повинні мати гладку поверхню, без здуттів, тріщин та розшарувань.

Форма зразка для випробування на розтяг повинна відповідати загальноприйнятим вимогам, руйнування повинно відбутися в робочій частині і в цій зоні повинен бути однорідний напружений стан. Звичайно розміри зразка такі:  $245 \times (3 \dots 4) \times (15 \pm 0,5)$  мм.

### Основні відомості з теорії

Склопластик являє собою конструкційний матеріал, в якому об'єднуються високі механічні характеристики та відносно невелика щільність. У склопластиках скляні волокна, що мають значну міцність та пружність об'єднуються в єдину монолітну систему полімерним зв'язуючим. Таким є, наприклад, пресовочний матеріал АГ-4. Цей матеріал передбачає застосування для виготовлення конструкцій прямим або ливарним пресуванням. Прес-матеріал АГ-4 марок С та НС виробляють у рулонах, на катушках або у вигляді зрізів з барабана.

Межу міцності при розтягу, як звичайно, обчислюють за формулою

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{A},$$

де  $F_{\max}$  - навантаження, при якому зразок зруйнувався;

$A$  - площа перерізу зразка до випробувань.

Відносне подовження при розриві

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta \ell_p}{\ell_0} = \frac{\ell_p - \ell_0}{\ell_0},$$

$\ell_0$  та  $\ell_p$  - довжина розрахункової частини зразка до випробувань та після них.

При визначенні модуля пружності на робочій частині зразка ставлять тензометри так, щоб їх бази розташовувались вертикально посередині ширини зразка з двох боків. Зразки піддаються шестиразовому навантаженню при швидкості 1,5... 2,0 кН/хв. Подовження вимірюють при двох навантаженнях: початковому ( $F_0$ ) й найбільшому ( $F_1$ ), що становлять відповідно 2 та 8... 10% від руйнуючого навантаження.

Модуль пружності обчислюють так:

$$E = \frac{\Delta F \cdot \ell}{A \cdot \Delta \ell},$$

де  $\Delta F = F_1 - F_0$  - приріст навантаження;

$\ell$  - база тензометра;

$\Delta \ell$  - середнє арифметичне приростів деформацій, обчислене за трьома останніми замірами.

Визначення межі пропорційності виконують одночасно з визначенням модуля пружності за формулою

$$\sigma_{ny} = \frac{F_{ny}}{A}.$$

#### Послідовність виконання роботи

Готовий зразок після вимірів закріплюють в зачіпках випробувальної машини і початковим малим навантаженням усувають нещільності та просковзування в зачіпках. Далі ставлять з двох боків зразка тензометри і починають навантаження. Швидкість розсування зачіпок повинна становити  $5 \pm 1$  мм/хв. При навантаженнях  $F_0$  та  $F_1$ , що становлять відповідно 2 та 8... 10% передбаченого руйнуючого навантаження знімають показники тензометрів. Одночасно з випробуваннями на машині записується діаграма розтягу. Після цього тензометри знімають і, доводячи зразок до руйнування, визначають навантаження  $F_{max}$ .

Подовження  $\Delta \ell_p$ , що відповідає руйнуючому навантаженню, визначають на діаграмі розтягу шляхом лінійної екстраполяції.

Навантаження  $F_{ny}$ , що відповідає межі пропорційності, визначають на діаграмі розтягу. Воно відповідає першому перегину кривої.

Результати замірів та обчислені за ними межу міцності, відносне подовження при розриві, модуль пружності і межу пропорційності заносять в журнал спостережень.

#### Контрольні запитання

4. Яка мета лабораторної роботи?
5. Що являє собою склопластик?
6. Які особливості мають випробування склопластика на розтяг?
7. Як виглядає діаграма розтягу склопластика?

### **2.11. Визначення коефіцієнта поперечної деформації сталі**

Мета роботи: визначити коефіцієнт поперечної деформації – коефіцієнт Пуассона.

#### Випробувальна машина та прилади

Для проведення випробувань можна використати як гідравлічні, так і механічні машини для розтягу. Цю роботу виконують на машині ВМ-4Р (п. 1.2).

Для заміру деформацій використовують механічні тензометри або тензодатчики (п. 1.6, 1.7).

### Зразок для випробувань

Для розтягу використовують плоский сталевий зразок прямокутного перерізу довільної ширини та товщини. Щоб виключити вплив напруженого стану в місцях затиску зразка на показання тензометрів, вважають, що його довжина повинна в чотири-п'ять разів перевищувати ширину.

### Основні відомості з теорії

Велика кількість експериментів довели, що при одноосному розтягу (стиску) сталевий стержень останній змінює свої розміри як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках. При одноосному розтягу поздовжні його розміри збільшуються, а поперечні зменшуються. Здатність матеріала до деформування характеризується відносними деформаціями:

поздовжньою

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0}$$

та поперечною

$$\varepsilon' = \frac{\Delta b}{b_0},$$

де  $\Delta \ell = \ell_1 - \ell_0$  - абсолютна поздовжня деформація, що визначається як різниця між довжиною  $\ell_1$  стержня при дії навантаження та первісною довжиною  $\ell_0$ ;

$\Delta b = b_1 - b_0$  - абсолютна поперечна деформація, що визначається як різниця між шириною  $b_1$  стержня при дії навантаження та первісною шириною.

Модуль частки, одержаної діленням відносної поздовжньої на відносну поперечну деформацію, називається коефіцієнтом поперечної деформації або коефіцієнтом Пуассона:

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|.$$

Коефіцієнт Пуассона залежить виключно від пружних властивостей матеріалу і для кожного матеріалу постійний в межах лінійної пружності. Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона цілком характеризують пружні властивості матеріала. Для реальних матеріалів  $\nu$  може приймати значення від 0 до 0,5. Так, для пробки  $\nu = 0$ , для каучука та парафіна  $\nu \approx 0,5$ . Для більшості матеріалів  $\nu$  знаходиться в межах 0,25...0,3 і не залежить від знака навантаження, тобто є однаковим при розтягу й стиску. Для дюралю  $\nu = 0,31...0,36$ . Для пластиків дані про стійкі значення  $\nu$  відсутні.

### Послідовність виконання роботи

Зразок з наклеєними тензодатчиками закріплюють в зачіпки машини з перевіркою його центровки. При застосуванні важельних тензометрів їх ставлять після закріплення зразка в машині. Схема розташування тензодатчиків або тензометрів показана на рис. 34. Тут позначено: 1 – тензометр, розташований вздовж напрямку дії навантаження (на поздовжній осі зразка), 2 – поперек дії навантаження.

Навантаження прикладають частками  $\Delta F = 5$  кН. При кожному ступені навантаження беруть відліки на тензометрах. Випробування продовжують до навантаження  $F_{max} = 30$  кН. Така методика експеримента дає можливість зменшити вплив імовірних похибок і підтвердити існування лінійної залежності між поздовжніми та поперечними деформаціями в межах пружної роботи матеріалу.

При застосуванні тензодатчиків поздовжню та поперечну відносну деформації обчислюють за формулами (див. 1.7)

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell_1}{\ell_1} = \frac{1}{K_1} \frac{\Delta R_1}{R_1};$$

$$\varepsilon' = \frac{\Delta \ell_2}{\ell_2} = \frac{1}{K_2} \frac{\Delta R_2}{R_2}.$$

де  $\ell_1$  та  $\ell_2$  - бази відповідно поздовжнього 1 та поперечного 2 тензометрів;

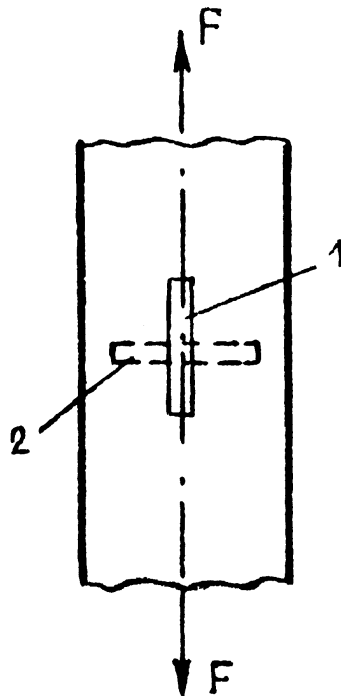


Рис. 34.

$\Delta \ell_1$  та  $\Delta \ell_2$  - абсолютне подовження та звуження зразка в межах баз тензодатчиків 1 та 2, що відповідають одному ступеню навантаження  $\Delta F$ ;

$R_1$  та  $R_2$  - початковий електричний опір тензодатчиків 1 та 2;

$\Delta R_1$  та  $\Delta R_2$  - прирости опору тензодатчиків, що відповідають одному ступеню навантаження  $\Delta F$ ;

$K_1$  та  $K_2$  - коефіцієнти чутливості тензодатчиків.

Тоді коефіцієнт Пуассона

$$\nu = -\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = -\frac{\Delta R_2 \cdot R_1 \cdot K_1}{\Delta R_1 \cdot R_2 \cdot K_2}.$$

Оскільки при випробуванні використовують тензодатчики однієї бази, однієї тензочутливості  $K_1 = K_2$  з однаковим початковим опором  $R_1 = R_2$ , вираження спрощується:

$$\nu = -\frac{\Delta R_2}{\Delta R_1}.$$

Більше того, оскільки виміри виконують за допомогою одного електричного моста, коефіцієнт Пуассона можна визначити за відношенням відліків  $n_1$  та  $n_2$ , одержаними на вимірювальному приладі:

$$\nu = \frac{n_2}{n_1}.$$

### Контрольні запитання

1. Що таке коефіцієнт Пуассона?
2. Які з деформацій, поздовжні чи поперечні, при розтягу більше за модулем?
3. Які зразки використовують для випробувань?
4. Назвіть межі, в яких повинен знаходитись коефіцієнт Пуассона в усіх випадках.
5. Які з наведених нижче величин не можуть бути значеннями коефіцієнта Пуассона для сталі: 0,5; 0,28; 0,15?

### 2.12. Випробування сталі на зріз

Мета роботи: вивчення характеру руйнування, визначення тимчасового опору сталі при зсуві.

Випробувальна машина та прилади

Випробування проводять на випробувальній машині УВМ-50 (п. 1.1) або іншій.

Зразок для випробувань

Для випробувань використовують сталевий циліндричний зразок діаметром  $d_0 = 2$  см і довжиною 14 см. Зразок вкладають у отвір пристрою, схема якого наведена на рис. 35.

Під дією навантаження, утвореного випробувальною машиною, середня частина пристрою зсувається разом з середньою частиною зразка відносно крайніх нерухомих частин. У місцях дотику середньої й крайніх частин має місце зсув (точніше – зріз) зразка. Робоча площа  $A_0$  зрізу дорівнює подвоєній площі поперечного перерізу зразка.



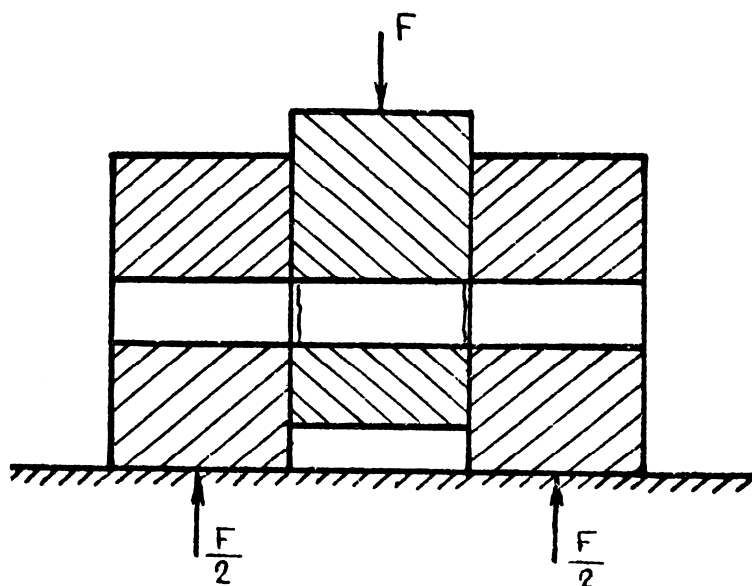


Рис. 35.

#### Основні відомості з теорії

Зсув має місце в тому випадку, коли два нескінченно близьких паралельних перерізи намагаються зміститися один відносно іншого, залишаючись нескінченно близькими та паралельними. Якщо всі точки одного перерізу зміщуються відносно іншого однаково за величиною та напрямком, така деформація відповідає чистому зсуву. При цьому дотичні напруження, що протидіють зсуву, будуть рівномірно розподілені в перерізі. Відтворити чистий зсув експериментально неможливо через низку обставин. Тому деформацію зсуву можна наочно відтворити явищем зрізу матеріалу зразка. Межа міцності на зріз визначається за формулою

$$\sigma_{\max.c.} = \frac{F_{\max}}{2A_0},$$

де  $F_{\max}$  - максимальне зусилля, що витримав зразок;

$A_0$  - площа одного зрізу:

$$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4};$$

$d_0$  - діаметр перерізу зразка.

#### Послідовність випробувань

Вимірюють діаметр зразка  $d_0$ . Пристрій із закладеним у нього зразком встановлюють між стискуючими площинами випробувальної машини.

Вмикають машину, поступово збільшуючи навантаження. Фіксують значення навантаження  $F_{\max}$ , що відповідає руйнуванню зразка.

Дані обміру зразка та  $F_{\max}$  заносять у журнал випробувань.

Обчислюють межу міцності сталі на зріз.

### Контрольні запитання

1. Назвіть мету лабораторної роботи.
2. Яку деформацію називають чистим зсувом?
3. Який зразок використовують при випробуванні?
4. Скільки площин зрізу має зразок?
5. Які напруження виникають в площинах зрізу зразка?
6. Чому дорівнює площа зрізу?
7. Як обчислюють межу міцності при зрізі?

### 2.13. Поперечний згин сталевій балки з визначенням модуля пружності

Мета роботи: визначення модуля пружності першого роду (модуля Юнга)  $E$  матеріалу балки.

Випробувальна машина та прилади

Випробування виконують на універсальній випробувальній машині УВМ-50 (п.1.1).

Для вимірювання прогинів балки використовують індикатор годинникового типу (п. 1.9).

Зразок для випробувань

Випробування виконують на сталевій балці прямокутного перерізу  $3 \times 10$  см довжиною 110 см (прольот при згині 100 см). Згин балки запроваджується в площині найбільшого моменту інерції перерізу. Схема завантаження балки та розміщення приладів наведена на рис. 36.

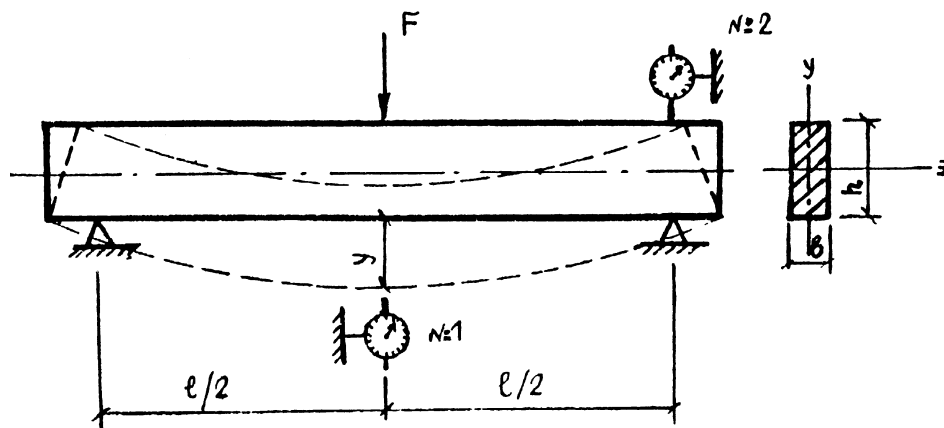


Рис. 36.

Для вимірювання прогину середнього перерізу ставлять індикатор (прогиномір) №1. Індикатор (прогиномір) №2 вимірює осадку балки  $y_0$  в цілому за рахунок пружної деформації матеріалу балки та опори в місці їх контакту.

Основні відомості з теорії

Модуль пружності  $E_x$  характеризує опір матеріалу пружній деформації при розтягу. Його значення: для сталі –  $2,1 \cdot 10^5$  МПа,

міді –  $1,0 \cdot 10^5$  МПа,  
 чавуна –  $(0,75 \dots 1,6) \cdot 10^5$  МПа,  
 алюмінію –  $0,675 \cdot 10^5$  МПа

Модуль пружності експериментально можна визначити з діаграми напружень при розтягу (рис. 37) як тангенс кута нахилу її лінійної частини

$$E = \frac{\sigma_{m\epsilon}}{\epsilon_{m\epsilon}} = \operatorname{tg} \alpha.$$

У цій роботі модуль пружності визначають з випробувань сталевієї балки на згин. Дійсно, в формулу для аналітичного визначення прогину в середині прольоту балки на двох шарнірних опорах входить модуль  $E$ :

$$y = \frac{F \ell^3}{48 E I_z}.$$

Вимірявши експериментально значення цього прогину, можна обчислити

$$E = \frac{F \ell^3}{48 \cdot I_z y}.$$

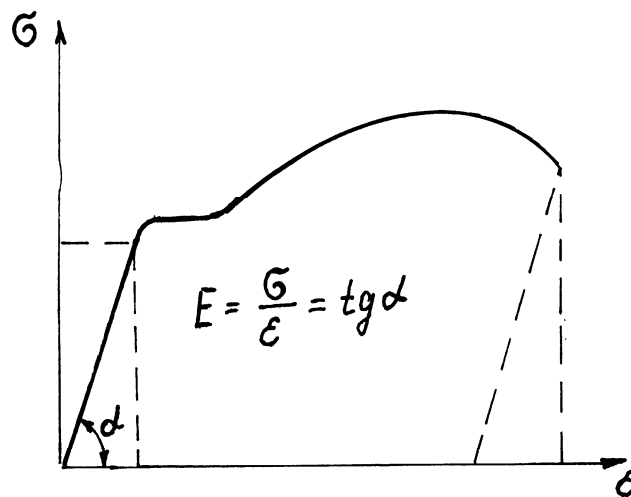


Рис. 37.

#### Послідовність виконання роботи

Сталеву балку встановлюють на машині, закріплюють індикатори згідно з рис. 36.

Ввімкнувши машину, збільшують навантаження рівними частками по 5кН (500 кгс) і фіксують відповідні відліки  $A_1$  та  $A_2$  на індикаторах.

Найбільше навантаження, до якого виконують випробування, обирають так, щоб нормальні напруження не перевищували межі пропорційності  $\sigma_{m\epsilon}$ .

Далі обчислюють середній приріст прогину, що відповідає одній частці навантаження  $\Delta F$ :

$$\Delta y = \frac{cp\Delta A_2 - cp\Delta A_1}{10} \cdot K, \text{ см},$$

де  $cp\Delta A_1$  та  $cp\Delta A_2$  - середні прирости відліків індикаторів №1 та №2;

$K$  - ціна поділки індикатора.

Момент інерції перерізу балки відносно нейтральної осі

$$I_z = \frac{bh^3}{12} \text{ см}.$$

Модуль пружності визначають з формули прогину балки:

$$E = \frac{\Delta F \cdot \ell^3}{48I_z \cdot \Delta y}.$$

Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Для чого потрібно знати модуль пружності?
3. Як аналітично одержати формулу прогину балки?
4. Чому в роботі використовують два індикатори?

## 2.14. Визначення нормальних напружень уздовж висоти перерізу при згині балки прямокутного перерізу

Мета роботи: експериментальна перевірка лінійного закону розподілу нормальних напружень уздовж висоти перерізу сталеві балки та порівняння результатів експерименту з теоретичними значеннями.

Випробувальна машина та прилади

Роботу виконують на випробувальній машині УВМ-50 (п. 1.1). Для вимірювання деформацій використовують важельні тензометри (п. 1.6).

Зразок для випробувань

Для роботи потрібна сталеві балка прямокутного перерізу висотою 10 см, шириною 3 см. Довжина балки становить 110 см. Модуль пружності сталі  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа.

Схема завантаження балки та розташування тензометрів наведена на рис. 38.

Балку встановлюють на шарнірні опори  $A$  та  $B$  випробувальної машини, відстань між якими  $L=100$  см. Для забезпечення симетричного завантаження застосовують допоміжну балку  $CD$ , що передає навантаження на балку  $AB$  через опори  $C$  та  $D$ , розташовані на відстані  $a=30$  см. Для визначення напружень (деформацій) в зоні чистого згину (ділянка  $CD$ ) встановлюють уздовж висоти 5 тензометрів. Координати розміщення тензометрів:  $y_1=4,5$  см;  $y_2=2,5$  см;  $y_3=0$  (нейтральна вісь);  $y_4=-2,5$  см;  $y_5=-4,5$  см.

Основні відомості з теорії

З курсу опору матеріалів відомо, що при визначенні нормальних напружень при згині приймають гіпотезу плоских перерізів (гіпотезу Бернуллі).

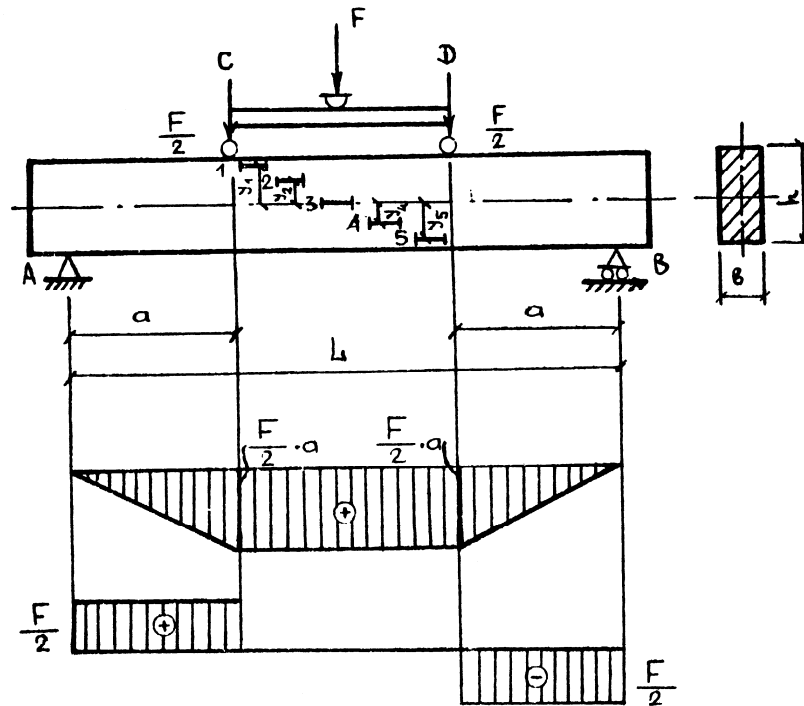


Рис. 38.

При плоскому згині в межах пружної роботи матеріалу балки напруження у точках поперечного перерізу визначають за формулою Нав'є:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I_z}, \quad (\text{а.})$$

де  $M$  - згинаючий момент у перерізі балки;

$y$  - відстань від нейтральної осі до тієї точки перерізу, в якій визначають напруження;

$I_z$  - момент інерції перерізу відносно нейтральної осі.

Найбільші нормальні напруження виникають у найбільш віддалених від нейтральної осі точках перерізу:

$$\sigma_{\max} = \frac{M \cdot y_{\max}}{I_z} = \frac{M}{W_z}, \quad (\text{б.})$$

де  $W_z$  - момент опору перерізу відносно нейтральної осі.

Для перевірки гіпотези плоских перерізів достатньо перевірити дійсність формули (а.) для кількох точок перерізу, тобто порівняти напруження, знайдені експериментальним шляхом та за означеною формулою.

При чистому згині поперечна сила в перерізах відсутня, отже зсув відсутній і дотичні напруження  $\tau = 0$ . Нормальні напруження будуть однакові для волокна балки, що знаходиться на одній відстані від нейтральної осі в усій зоні чистого згину. Це дозволяє розташувати тензометри для виміру деформацій у різних перерізах зони чистого згину, а визначені напруження віднести до одного перерізу.

Для визначення нормальних напружень за результатами випробувань використовують закон Гука:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (\text{в.})$$

де  $\varepsilon$  - відносна лінійна деформація за вимірами тензометра;

$E$  - модуль пружності матеріала балки.

#### Послідовність виконання роботи

При початку випробувань необхідно вибрати вільний рух в тензометрах, тому перший відлік знімають на всіх п'яти тензометрах при навантаженні 5 кН (500 кГс). Далі навантаження збільшують ступенями по 5 кН до 30 кН (3000 кГс). На кожному ступені навантаження відліки тензометрів записують в журнал лабораторних робіт.

Найбільше навантаження при випробуванні (30 кН) обирають так, щоб напруження не перевищували межі пропорційності матеріалу балки.

У журналі лабораторних робіт обчислюють теоретичні (а.) та експериментальні (в.) значення напружень в усіх п'яти точках. Порівнюючи ці значення, обчислюють різницю у відсотках. Для наочності за одержаними даними будують епюри нормальних напружень уздовж висоти перерізу, накладаючи експериментальну й теоретичну епюри одна на іншу. Відхилення експериментальних значень напружень від теоретичних обумовлені похибками випробувань та прийнятим умовним модулем пружності, який може відрізнятися від дійсного.

#### Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Як залежить величина нормальних напружень від розташування точки вздовж висоти перерізу?
3. Якими приладами вимірюють деформації?
4. Яку пружну характеристику матеріалу необхідно знати для обчислення напружень за деформаціями?

### **2.15. Визначення нормальних напружень при згині балки за допомогою датчиків електричного опору**

Мета роботи: визначення шляхом експерименту величин нормальних напружень у точках перерізу сталеві балки при чистому згині і порівняння їх з теоретичними значеннями.

#### Випробувальна машина та прилади

Випробування виконують на машині УВМ-50 (п. 1.1). Для вимірювання деформацій використовують датчики електричного опору – тензодатчики типу 2ПКБ-20-200 (п. 1.7).

#### Зразок для випробувань

Для випробувань використовують сталеву балку прямокутного перерізу 3×10 см довжиною 110 см з модулем пружності  $E=2 \cdot 10^5$  МПа. Схема завантаження балки та розташування тензодатчиків на рис. 39. Прольот балки

$L=100$  см, навантаження передається через допоміжну балку  $CD$ . Опори допоміжної балки розташовані на відстані  $a=30$  см від опор основної балки.

Відстані від нейтральної осі до тензодатчиків:  $y_1=y_5=4,5$  см;  $y_2=y_4=2,5$  см;  $y_3=0$ . Компенсаційний тензодатчик наклеюють за межами опор  $AB$  балки, де відсутні деформації.

#### Основні відомості з теорії

Відомості з теорії наведені в лабораторній роботі 2.14.

#### Послідовність виконання роботи

Послідовність випробувань співпадає з послідовністю випробувань лабораторної роботи 2.14.

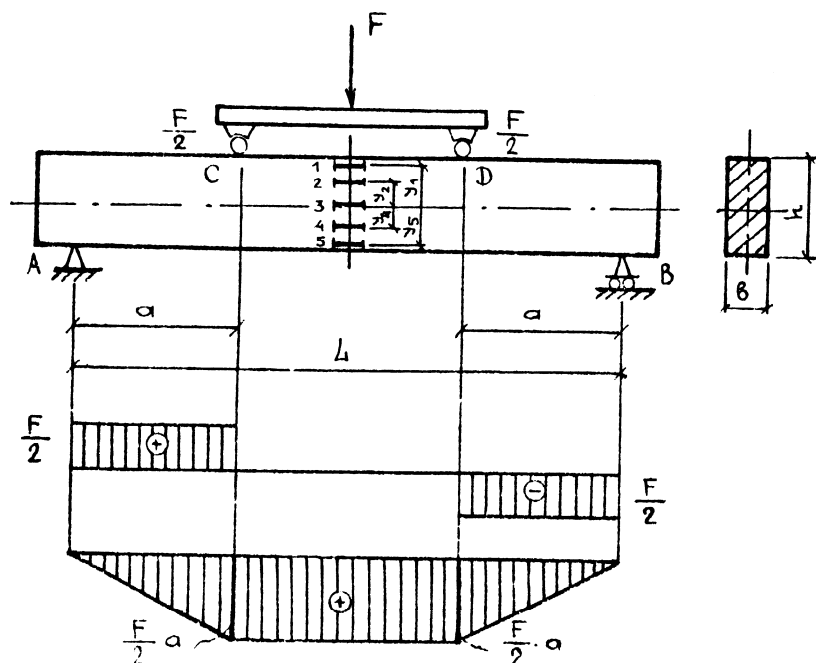


Рис. 39.

#### Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Які прилади використовують для виміру деформацій у даній роботі?
3. Що являє собою тензодатчик, за яким принципом він працює?
4. Як визначаються експериментальні й теоретичні значення нормальних напружень?

### 2.16. Визначення головних напружень при згині

Мета роботи: визначення головних напружень при згині на рівні нейтрального шару та порівняння експериментальних даних з теоретичними.

#### Випробувальна машина та прилади

Випробування виконують на універсальній випробувальній машині УВМ-50 (п. 1.1), для вимірювання деформацій використовують важельні тензометри (п. 1.6).

### Зразок для випробувань

Згину піддається сталеві балка прямокутного або двотаврового перерізу, розташована на двох опорах, відстань між якими становить 100 см (рис. 40).

Навантаження прикладають посередині прольоту балки.

Головні напруження визначають на рівні нейтрального шару. Для цього встановлюють два тензометри так, щоб середини їхніх баз були розташовані на рівні нейтральної осі, а кут нахилу баз до нейтральної осі становив  $45^\circ$ .

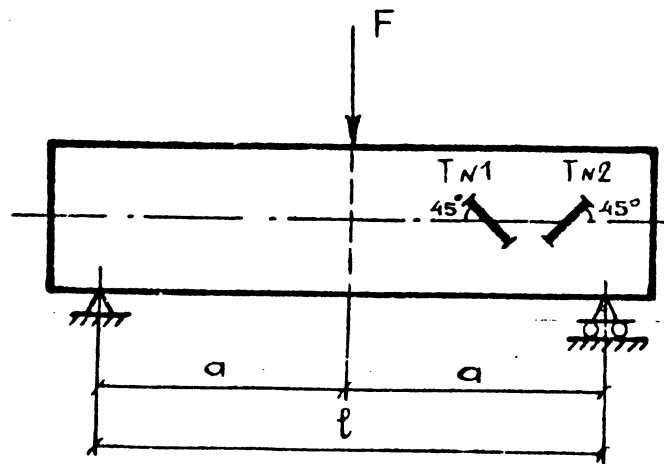


Рис. 40.

### Основні відомості з теорії

Головними називають напруження на головних площинах, тобто на таких, на яких дотичні напруження обертаються на нуль. У загальному випадку в кожній точці просторового тіла таких площин, а отже й напружень три.

Виріжемо елемент балки  $kmcd$   $k'm'c'd'$  (рис. 41). й розглянемо напруження на його гранях.

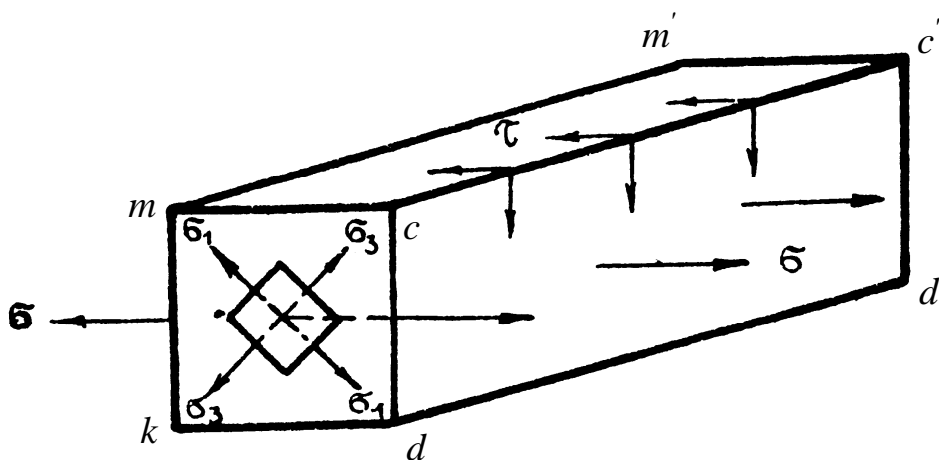


Рис. 41



При плоскому згині грань  $kmcd$  й усі паралельні їй площини знаходяться в однаковому напруженому стані.

Фасадна грань  $kmcd$  вільна від навантаження, на ній відсутні як дотичні, так і нормальні напруження. Отже ця грань є однією з головних площин з головними напруженнями  $\sigma_2 = 0$ . Такий напружений стан називають плоским (рис. 41,б).

Інші головні напруження визначають за формулою:

$$\sigma_{1,3} = \frac{1}{2} \left( \sigma \pm \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \right).$$

Розташування відповідних головних площин визначається кутом  $\varphi$

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\tau}{\sigma},$$

додатне значення якого відраховують від горизонтальної осі  $x$  до напрямку  $\sigma_1$  за ходом годинникової стрілки.

При розташуванні елемента  $kmcd$  на рівні нейтральної осі ( $y=0$ ) нормальні напруження дорівнюють нулю, отже

$$\sigma_{1,3} = \pm \tau = \pm \frac{Q \cdot S}{b \cdot I},$$

а

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\tau}{0} = \frac{1}{2} \arctg \infty = 45^\circ.$$

Таким чином, головні площини на рівні нейтральної осі спрямовані під кутом  $45^\circ$  до цієї осі.

При експериментальному визначенні головних напружень використовують формули узагальненого закону Гука:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} (\sigma_1 - \mu \sigma_3);$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} (\sigma_3 - \mu \sigma_1),$$

звідки, враховуючи, що на нейтральній осі  $\sigma_3 = -\sigma_1$ ;  $\sigma_1 = \frac{E}{1+\mu} \varepsilon_1$ ,

$$\sigma_3 = \frac{E}{1+\mu} \varepsilon_3.$$

Середній приріст відносних деформацій  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_3$  одержують з випробувань за середніми приростами (ср. 44) показників відповідного тензометра.

#### Послідовність виконання роботи

Знаючи теоретичний напрямок головних напружень, визначають, який з тензометрів на рис. 40 вимірює деформацію у напрямку  $\sigma_1$ , а який – у

напрямку  $\sigma_3$ . Напрямки головних напружень та еюра поперечних сил наведені на рис. 42.

Завантаживши балку деяким початковим навантаженням, знімають відліки тензометрів і записують їх у журнал лабораторної роботи. У подальшому навантаження збільшують однаковими частками  $\Delta F$ .

Тензометр, розташований в напрямку  $\sigma_1$ , повинен показувати збільшення відліків, а в напрямку  $\sigma_3$  - зменшення відліків. Показання тензометрів фіксують у журналі.

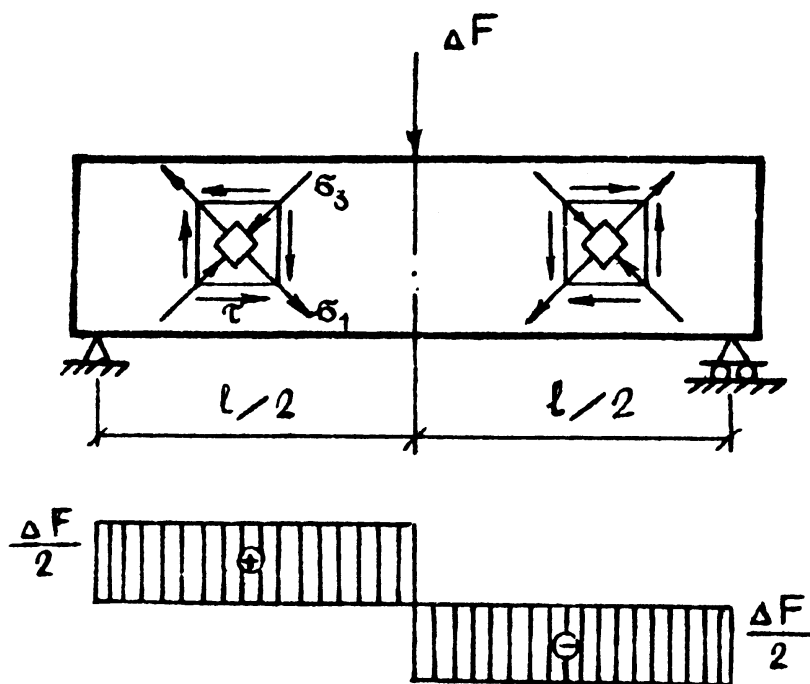


Рис. 42.

Після доведення навантаження до максимального балку розвантажують і виконують контрольний замір при початковому навантаженні. Це потрібно для перевірки роботи тензометрів.

Максимальне навантаження при випробуванні повинно обиратись так, щоб матеріал балки працював у пружній стадії.

У журналі лабораторної роботи визначають середні прирости відліків кожного тензометра (ср.  $\Delta A_1$ , ср.  $\Delta A_3$ ) і середні прирости деформацій

$$\varepsilon_1 = \frac{cp\Delta A_1}{\ell \cdot K_1 \cdot 10^4}, \quad \varepsilon_3 = \frac{cp\Delta A_3}{\ell \cdot K_2 \cdot 10^4},$$

де  $\ell$  - база тензометра,

$K_1, K_2$  - ціна поділки тензометрів.

Далі обчислюють експериментальні

$$\sigma_1 = \frac{E}{1+\mu} \varepsilon_1; \quad \sigma_3 = \frac{E}{1+\mu} \varepsilon_3.$$

і теоретичні

$$\sigma_{1,3} = \pm \frac{\Delta F \cdot S}{2b \cdot I}$$

значення головних напружень. В останній формулі

$S = \frac{bh^2}{8}$  – статичний момент половини перерізу балки відносно нейтральної

осі,  $I = \frac{bh^3}{12}$  – момент інерції перерізу відносно нейтральної осі.

Порівняння теоретичних та експериментальних значень виконують, обчислюючи відсоткову різницю між ними:

$$\frac{\sigma_e - \sigma_{теор.}}{\sigma_e} \cdot 100\%.$$

Ця різниця з'являється переважно за рахунок похибок приладів та неточного розташування їх на балці.

#### Контрольні запитання

1. Які площини називають головними?
2. Які напруження називають головними?
3. Що таке плоский напружений стан?
4. Як визначають розташування головних площин?

### 2.17. Визначення прогинів та кутів поворота балки прямокутного перерізу при плоскому згині

Мета роботи: визначення шляхом експерименту величин прогинів  $y(x)$  та кутів поворота  $\theta(x)$  і порівняння їх з величинами, одержаними з теоретичних розрахунків.

#### Випробувальна машина та прилади

Випробування виконують на машині УВМ-50 (див. п. 1.1). Для визначення прогинів використовують прогиноміри (п. 1.9). Кути поворота вимірюють дзеркальним тензометром (п. 1.8).

#### Зразок для випробувань

Випробування виконують на сталевій балці прямокутного перерізу  $3 \times 10$  см довжиною 110 см. Прольот балки при згині становить 100 см. Згин відбувається в площині її найбільшої жорсткості. Схема завантаження й розташування вимірювальних приладів наведена на рис. 43.

Індикатор (прогиномір) 1 вимірює прогин у середині прольоту. Індикатор 2 потрібний для вимірювання осадки балки  $y_0$  за рахунок пружної деформації матеріалу балки та опори в місці їх стиску. Кут повороту перерізу на опорі вимірюють дзеркальним тензометром (дзеркальце на кронштейні 5, вимірювальна лінійка 3, зорова трубка 4).

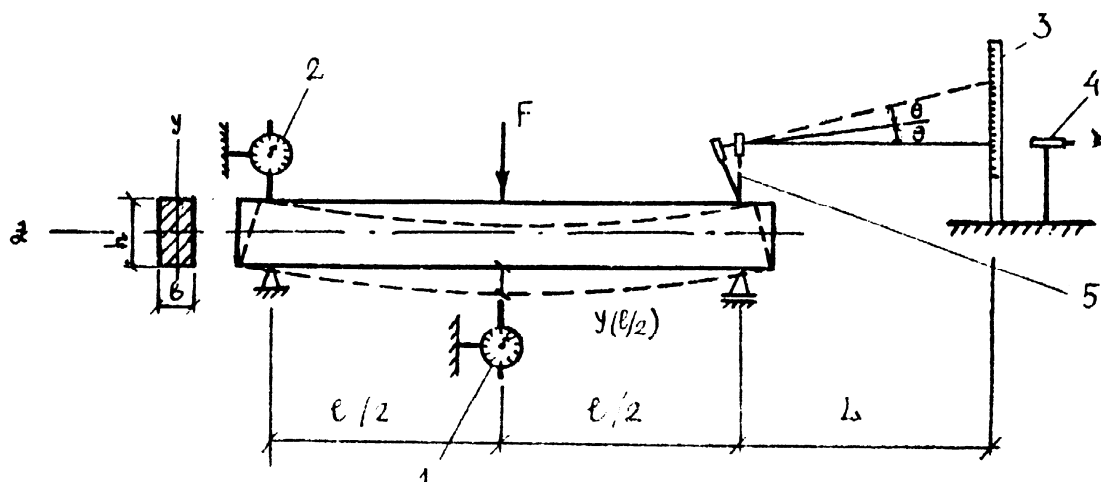


Рис. 43.

### Основні відомості з теорії

Зігнуту під дією поперечного навантаження поздовжню вісь балки називають пружною лінією. Переміщення поперечного перерізу балки при згині характеризують дві величини: прогин  $y(x)$  та кут поворота  $\theta(x)$  (рис. 44).

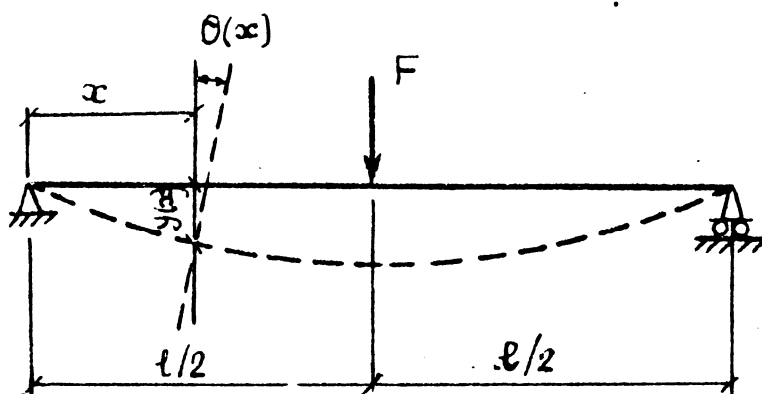


Рис. 44.

Теоретичні величини прогину й кута поворота перерізу балки можна знайти будь-якими відомими методами, наприклад, початкових параметрів або Мора. Вони відповідно складають: для середнього перерізу

$$y\left(\frac{\ell}{2}\right) = \frac{F\ell^3}{48EI_z}, \quad \theta\left(\frac{\ell}{2}\right) = 0,$$

для перерізу на опорі

$$y(0) = 0, \quad \theta(0) = \frac{F\ell^2}{16EI_z},$$

де  $E$  - модуль пружності першого роду (для сталі  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа);

$I_z = \frac{bh^3}{12}$  - момент інерції перерізу відносно нейтральної осі.

### Послідовність виконання роботи

Дослідну балку встановлюють на машині, закріплюють відповідно рис. 43 індикатори 1,2 і дзеркальний тензометр (3-5).

Прикладають початкове навантаження 5 кН, щоб вибрати нещільності в установці. Далі навантаження збільшують однаковими частками  $\Delta F = 5$  кН. На кожному ступені навантаження знімають відліки на приладах.

Найбільше навантаження  $F_{max}$  при випробуванні обирають так, щоб матеріал балки не вийшов за межі пружної стадії роботи. Після досягнення цієї величини навантаження випробування закінчують.

Обчислення теоретичних значень прогину та кута повороту виконують для однієї частки навантаження:

$$y\left(\frac{\ell}{2}\right) = \frac{\Delta F \ell^3}{48EI_z}, \quad \theta(0) = \frac{\Delta F \ell^2}{16EI_z}.$$

Для визначення експериментальних величин переміщень обчислюють середні значення приростів відліків приладів: ср.  $\Delta A_1$ , ср.  $\Delta A_2$ , ср.  $\Delta A_3$ .

Експериментальні значення прогину середнього перерізу балки та кута повороту опорного перерізу, що відповідають одній частці навантаження

$$y_e\left(\frac{\ell}{2}\right) = \frac{cp\Delta A_1 - cp\Delta A_2}{100 \cdot 10}, \text{ см,}$$

$$\theta_e(0) = \frac{cp\Delta A_3}{2 \cdot L \cdot 10}, \text{ рад,}$$

де  $L$  - відстань від вимірювальної лінійки дзеркального тензометра до опори, де розташоване дзеркальце приладу.

Найбільший прогин всередині прольоту і найбільший кут поворота опорного перерізу, що досягається при випробуваннях:

$$y_{max} = \frac{A_{1max} - A_{2max}}{100 \cdot 10},$$

$$\theta_{max} = \frac{A_{3max}}{2 \cdot L \cdot 10}.$$

### Контрольні запитання

1. Які величини характеризують переміщення перерізу балки?
2. Як одержати формули для визначення теоретичних переміщень балки?
3. Як залежать переміщення балки від пружних характеристик матеріалу?
4. Що таке жорсткість балки при згині і як на її величину впливають геометричні характеристики перерізу?
5. Які прилади використовують для експериментального визначення переміщень балки?

## 2.18. Випробування сталевго циліндричного зразка на кручення

Мета роботи: вивчення поведінки матеріалу при крученні; визначення межі пропорційності  $\tau_{nu}$ , межі міцності  $\tau_{max}$  та модуля пружності  $G$  при зсуві.

### Випробувальна машина та прилади

Випробування зразка на кручення виконують на машині АМ-1 (п. 1.3).

Для вимірювання кутів закручення зразка можуть використовуватись механічний та дзеркальний тензometri. У цій роботі користуються дзеркальним тензометром Мартенса (п. 1.8).

### Зразок для випробувань

У роботі використовують стандартний циліндричний зразок ( $d=0,8$  см,  $\ell=10$  см – розрахункова довжина). Модуль пружності першого роду матеріалу зразка  $E$ , коефіцієнт поперечної деформації (Пуассона)  $\mu$  відомі. Зразок і схема діючих на нього сил наведені на рис. 45.

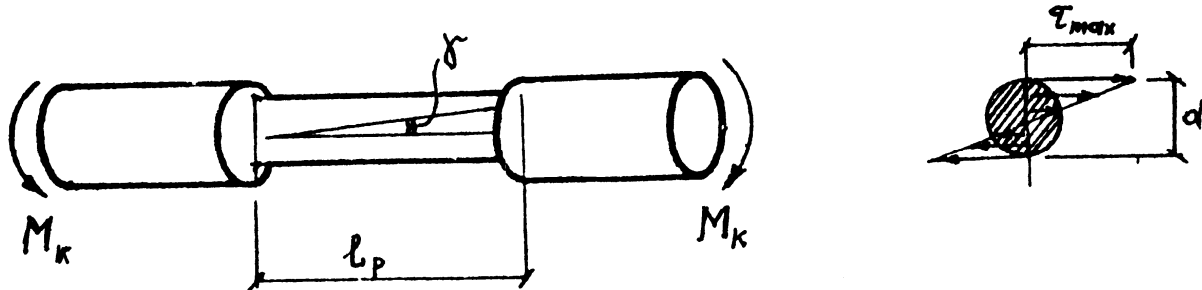


Рис. 45.

### Основні відомості з теорії

При крученні зразка в точках його перерізу виникають дотичні напруження

$$\tau = \frac{M_k \cdot \rho}{I_\rho},$$

де  $M_k$  - крутний момент у перерізі,

$\rho$  - відстань від центра кручення перерізу (центра круглого перерізу) до точки, в якій визначають напруження,

$I_\rho = \frac{\pi d^4}{32}$  - полярний момент інерції круглого перерізу.

Найбільшого значення дотичні напруження досягають у точках перерізу на поверхні зразка при  $\rho = \rho_{max} = r$ :

$$\tau_{max} = \frac{M_k \cdot r}{I_\rho} = \frac{M_k}{W_\rho},$$

де  $W_\rho = \frac{I_\rho}{r} = \frac{\pi d^3}{16}$  - момент опору крученню круглого перерізу.

Модуль пружності при зсуві можна знайти з формули для кута закручення зразка

$$\theta = \frac{M_{кнц} \cdot \ell}{G I_{\rho}},$$

де  $M_{кнц}$  - крутний момент, що відповідає межі пропорційності, на розрахунковій довжині  $\ell$  зразка,

$\theta$  - кут закручення зразка на довжині  $\ell$ ,

$G$  - модуль пружності матеріалу при зсуві.

Отже

$$G = \frac{M_{кнц} \ell}{\theta I_{\rho}}.$$

Наведені формули для  $\theta$  та  $G$  дійсні для крутних моментів  $M_k \leq M_{кнц}$ , тобто коли матеріал зразка працює в пружній стадії.

#### Послідовність виконання роботи

Перед випробуваннями вимірюють діаметр  $d$  зразка та розрахункову довжину. Зразок закріплюють в зачіпках машини і встановлюють на кінцях його розрахункової довжини дзеркальні тензометри  $A$  і  $B$ , як показано на рис. 46.

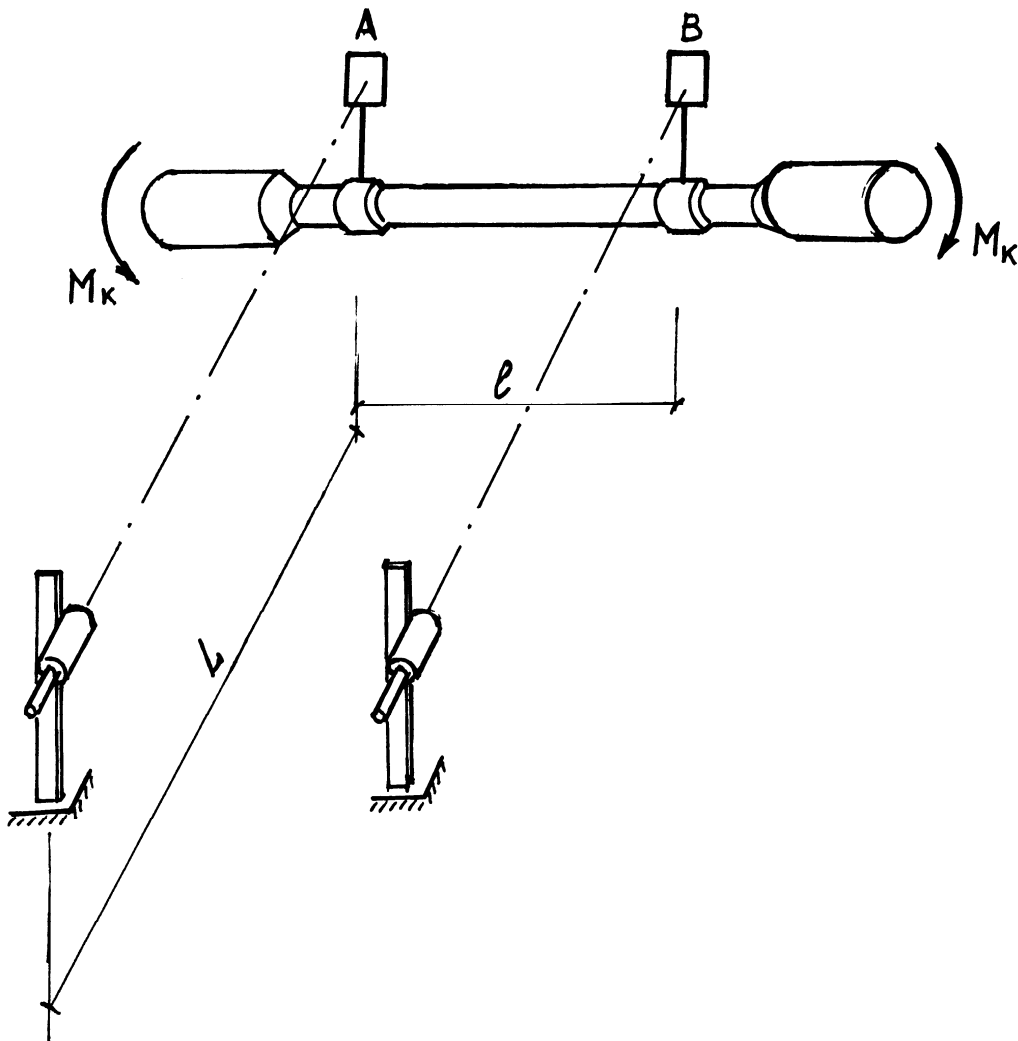


Рис. 46.

Заносять в журнал лабораторної роботи вихідні дані  $d$ ,  $\ell$ ,  $L$ ,  $E$ ,  $\mu$ .

Навантаження – крутний момент – прикладають однаковими частками  $\Delta M_k$ . Після кожного ступеня навантаження знімають відліки на дзеркальних тензометрах  $A$  та  $B$ .

Згідно із законом Гука кути закручення  $\Delta\theta$ , що відповідають однаковим приростам крутного моменту  $\Delta M_k$ , будуть однакові. Граничне значення момента, до якого дійсний закон Гука дає момент  $M_{k\text{нц}}$ , що відповідає межі пропорційності. Отже

$$\tau_{\text{нц}} = \frac{M_{k\text{нц}}}{W_\rho}.$$

Після досягнення  $M_{k\text{нц}}$  тензометри знімають і продовжують збільшувати навантаження. Межу міцності при зсуві знаходять за значенням момента  $M_{k\text{мах}}$ , що відповідає руйнуванню зразка:

$$\tau_{\text{мах}} = \frac{M_{k\text{мах}}}{W_\rho}.$$

Для визначення модуля пружності при зсуві обчислюють середній приріст різниць показників тензометрів у межах пружної роботи матеріала зразка

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{\Sigma(\Delta A - \Delta B)}{n} = \frac{\Sigma(A + B)}{n},$$

де  $n$  - число ступенів навантаження до межі пропорційності.

За одержаними значеннями знаходять середній приріст кута закручення:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta_{\text{ср}}}{2\ell}$$

та модуль пружності при зсуві

$$G = \frac{\Delta M_k \cdot \ell}{\Delta\theta \cdot I_\rho}.$$

Діаграму кручення будують в масштабі за відповідними точками (рис. 47).

#### Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Як визначають теоретичні дотичні напруження та кути закручення?
3. Де діють найбільші дотичні напруження в перерізі циліндричного стержня при його крученні?



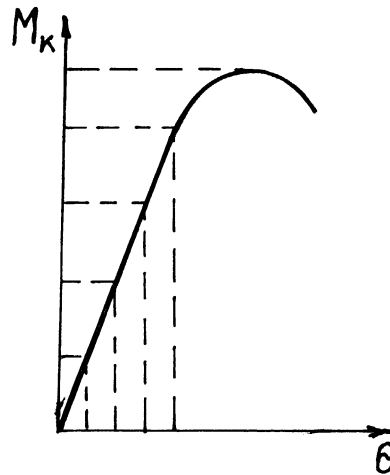


Рис. 47.

4. Як працює машина АМ-1?
5. Який принцип роботи дзеркального тензометра Мартенса?
6. Чи пов'язані між собою значення модулів пружності  $E$  та  $G$ ?

## 2.19. Визначення деформацій циліндричної гвинтової пружини при стиску

Мета роботи: експериментальне визначення осідання циліндричної сталеві пружини.

Випробувальна машина та прилади

Випробування виконують на машині УВМ-50 (п. 1.1). Для визначення осідання пружини використовують індикатори годинникового типу (п. 1.9).

Зразок для випробувань

Для випробувань використовують циліндричну гвинтову сталеву пружину (рис. 48). Її розміщують як показано на рис. 48 між верхньою нерухомою 1 і нижньою рухомою 2 опорами. Оскільки діаметр пружини дещо більше діаметра опор, між пружиною та опорами ставлять сталеві пластини 3. Під час роботи машини нижня опора піднімається і спричиняє стискання пружини. Індикатори 4 закріплюють на нерухомих стояках 5 машини, розташованих на діаметрально протилежних боках пружини. Шток 6 кожного індикатора спирається на нижню пластину 3. Отже показники індикаторів дають осідання пружини.

Щоб одержані в роботі результати були близькі до реальних необхідно мати не менше двох індикаторів. Це пов'язано з необхідністю виключення впливу похибок устаткування та зразка: відхилення осі пружини від осей опор 1 та 2; відхилення опорних пластин від горизонталі; наявність при випробуванні не тільки стискання, але й згину пружини.

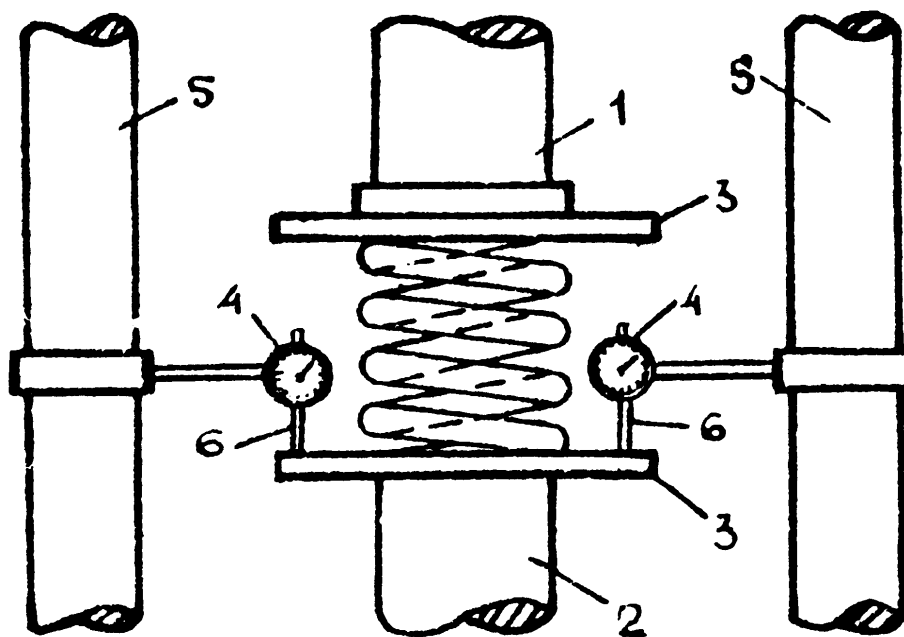


Рис. 48.

#### Основні відомості з теорії

При стисканні пружини зменшується відстань між сусідніми витками і, отже, її довжина. Зміна довжини пружини при стиску  $\lambda = \ell - \ell_1$  називається осіданням пружини.

$\ell$  - первинна довжина пружини;

$\ell_1$  - довжина стиснутої пружини.

У техніці переважно застосовують циліндричні пружини з малим кроком гвинта. Для таких пружин осідання зумовлене переважно деформаціями кручення. Теоретичне визначення осідання виконують за формулою

$$\lambda = \frac{8FD^3n}{Gd^4},$$

де  $F$  - стискуюча сила;

$D$  - середній діаметр пружини;

$n$  - кількість витків пружини;

$G$  - модуль пружності матеріалу пружини при зсуві;

$d$  - діаметр стержня пружини.

Геометричні розміри пружини наведені на рис. 49.

Формула для осідання пружини одержана в курсі опору матеріалів з використанням ряду гіпотез, тому експеримент дає можливість перевірити її придатність для практичних розрахунків.

Слід зазначити, що теоретична формула для осідання пружини дійсна лише за умови пружної стадії роботи матеріалу. Максимальне навантаження при випробуваннях повинно обиратися з урахуванням цієї обставини.

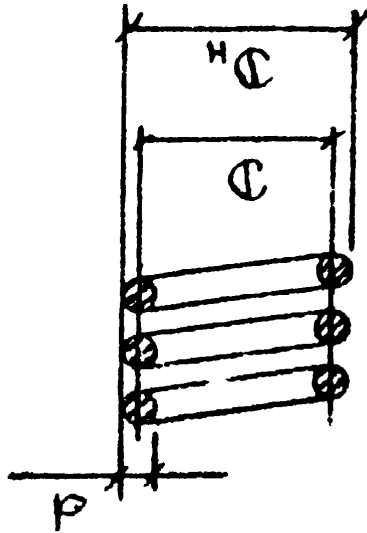


Рис. 49.

#### Послідовність виконання роботи

Вимірявши зовнішній діаметр  $D_n$  пружини і діаметр її стержня, визначають середній діаметр  $D = D_n - d$ . Модуль пружності матеріалу пружини при зсуві  $G = 0,8 \cdot 10^5$  МПа.

Розрахункову кількість витків пружини  $n$  визначають з урахуванням того, що у пружин, які працюють на стиск, крайні витки підтиснуті й зашліфовані з торців для забезпечення опорних площин. Вважають, що в роботі не задіяними є приблизно 1,5 витка. У пружині, що використовується в лабораторній роботі, повна кількість витків (з урахуванням підтиснутих) 4,5, отже

$$n = 4,5 - 1,5 = 3.$$

Випробування починають з деякого початкового навантаження, наприклад 5 кН, при якому записують перші відліки індикаторів. Далі навантаження збільшують однаковими частками, наприклад  $\Delta F = 5$  кН., кожен раз знімаючи відліки на приладах. Випробування припиняють при досягненні навантаження  $F_{max} = 12,5 \dots 15,0$  кН.

Обчисливши суми відліків індикаторів та прирости сум, знаходять середній приріст

$$\Delta(A_1 + A_2)_{cp} = \frac{\Sigma \Delta(A_1 + A_2)}{m},$$

де  $m$  - кількість приростів.

Експериментальна величина осідання пружини, що відповідає одній частці навантаження  $\Delta F$

$$\lambda_e = \frac{0,5 \Delta(A_1 + A_2)_{cp} \cdot K}{10}, \text{ см,}$$

де  $K$  - ціна поділки шкали індикатора, мм.

Визначивши відповідне теоретичне значення осідання

$$\lambda_m = \frac{8\Delta F D^3 n}{G d^4},$$

обчислюють розбіжність його з експериментальним:

$$\varepsilon = \frac{|\lambda_e - \lambda_m|}{\lambda_m} \cdot 100 \, \%.$$

#### Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Якими деформаціями стержня пружини обумовлене її осідання?
3. Як визначається експериментальне осідання пружини?
4. Як визначається розрахункова кількість витків пружини?
5. Чим можна обумовити розбіжність між теоретичним та експериментальним значенням осідання?

### 2.20. Визначення напружень при позацентровому стиску стержня

Мета роботи: експериментальна перевірка теоретичної формули для нормальних напружень при позацентровому стиску.

#### Випробувальна машина та прилади

Випробування виконують на машині УВМ-50 (п. 1.1). Для визначення деформацій використовують важельні тензометри (п. 1.6).

#### Зразок для випробувань

У роботі використовують зразок круглого поперечного перерізу  $d=80$  мм;  $L=200$  см. Розміщення зразка та приладів показано на рис. 50.

Зразок 1 розміщують між верхньою нерухомою 2 і нижньою рухомою 3 опорами. Для здійснення позацентрового стиску між торцями зразка та опорами ставлять сталеві пластини 4. Ці пластини, а також торці зразка на деякій відстані від центра мають заглиблення, в які вкладають сталеві кульки 5. Отже, навантаження на зразок передається через кульки, тобто позацентрово. На зразок в середній його частині ставлять два тензометри 6 в площині, що проходить через кульки та вісь зразка. Тензометри розташовані на діаметрально протилежних боках зразка (рис. 50).

#### Основні відомості з теорії

Позацентровим називають стиск стержня силами, які прикладені не в центрі ваги його поперечних перерізів. Позацентровий стиск зводиться до комбінації центрального стиску та згину в двох головних площинах. Через наявність згину нормальні напруження розподіляються за перерізом стержня нерівномірно. Теоретична формула для нормальних напружень при позацентровому стиску має вигляд

$$\sigma = -\frac{F}{A} \left( 1 + \frac{y_F y}{i_z^2} + \frac{z_F z}{i_y^2} \right), \quad (\text{a.})$$

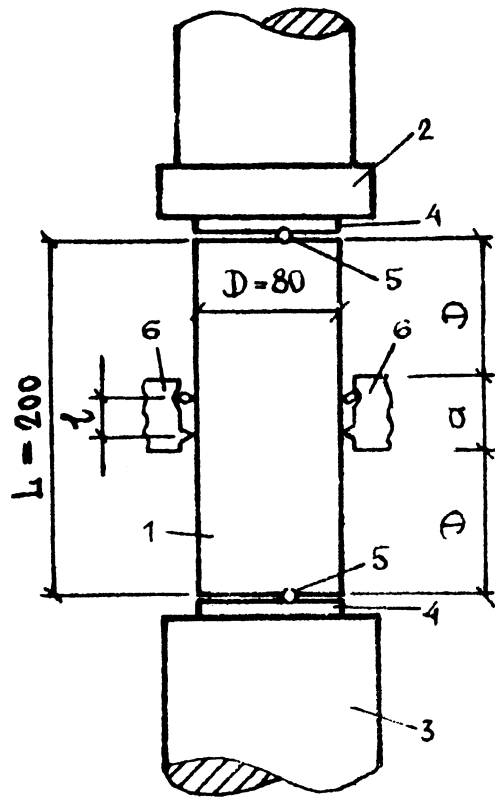


Рис. 50.

де  $A$  - площа поперечного перерізу стержня;

$y_F, z_F$  - координати точки прикладання сили  $F$ ;

$y, z$  - координати точки, в якій обчислюють напруження;

$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}, i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$  - радіуси інерції перерізу відносно головних осей  $z$  та  $y$ ;

$I_z, I_y$  - моменти інерції поперечного перерізу відносно осей  $z$  та  $y$ .

У роботі використовують стержень колового перерізу, тому одну з двох центральних осей можна провести через точку прикладання сили (рис. 51).

При цьому формула для напружень спрощується, оскільки  $y_F = 0$ . Крім того, для кола

$$I_y = I_z = \frac{\pi d^4}{64}; A = \frac{\pi d^2}{4};$$

$$i_y = i_z = \sqrt{\frac{\pi d^4 \cdot 4}{64 \cdot \pi d^2}} = \frac{d}{4}.$$

Слід відзначити, що формула (а.) непридатна для визначення напружень кінців стержня. Тут характер розподілу напружень за перерізом далекий від лінійного, що відповідає формулі (а.). Згідно з принципом Сен-Венана ця формула дійсна лише для перерізів, достатньо віддалених від кінців. Ця

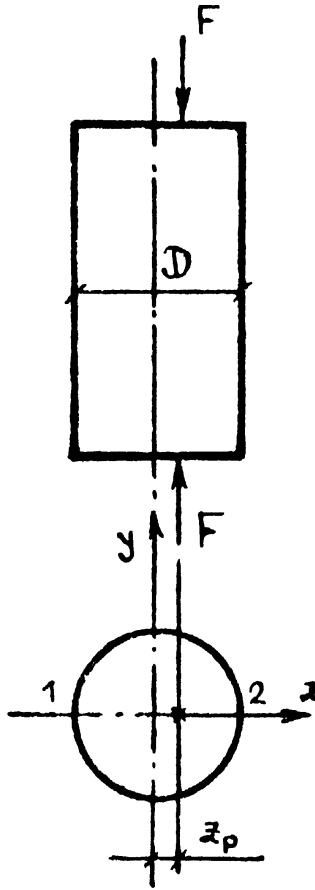


Рис. 51.

відстань повинна бути не менше характерного розміру перерізу (у цій роботі діаметра перерізу).

Крім того, формула дійсна лише за умов роботи матеріалу стержня в межах пропорційності. Тому при випробуваннях потрібне обмеження стискуючого навантаження.

#### Послідовність виконання роботи

На початку роботи вимірюють діаметр  $d$  зразка та координати  $z_F$  точки прикладання стискуючої сили. Обчислюють площу перерізу  $A$  та радіус інерції  $i_y$ . Модуль пружності матеріалу зразка (сталь)  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа =  $2 \cdot 10^4$  кН/см<sup>2</sup>.

Визначають ціну поділки  $c$  та базу  $\ell$  тензометрів.

Випробування починають з деякого початкового навантаження, наприклад 10 кН, при якому знімають перші відліки приладів. Далі навантаження збільшують однаковими частками, наприклад  $\Delta F = 30$  кН., знімаючи на кожній ступені навантаження відповідні відліки тензометрів. Випробування зупиняють при навантаженні 100... 130 кН.

Відповідно до формули (а.) напруження при останньому навантаженні становить 40...52 МПа, тобто набагато менше межі пропорційності сталі (200-300 МПа).

Знаходять середній приріст відліків

$$\Delta A_{1cp} = \frac{\Sigma \Delta A_1}{m}; \Delta A_{2cp} = \frac{\Sigma \Delta A_2}{m},$$

де  $m$  - число приростів.

За цими значеннями обчислюють відносну деформацію, що відповідає одній частці навантаження  $\Delta F$  для першого й другого тензометрів:

$$\varepsilon_{1e} = \frac{\Delta A_{1cp} \cdot c}{\ell}; \quad \varepsilon_{2e} = \frac{\Delta A_{2cp} \cdot c}{\ell}$$

і, далі, напруження в точках 1 та 2 для однієї частки навантаження

$$\sigma_{1e} = E \cdot \varepsilon_{1e} = E \frac{\Delta A_{1cp} \cdot c}{\ell},$$

$$\sigma_{2e} = E \cdot \varepsilon_{2e} = E \frac{\Delta A_{2cp} \cdot c}{\ell}.$$

Теоретичні значення напружень в точках 1 та 2 для однієї частки навантаження

$$\sigma_{1m} = -\frac{\Delta F}{A} \left( 1 + \frac{z_F \cdot z_1}{i_y^2} \right),$$

$$\sigma_{2m} = -\frac{\Delta F}{A} \left( 1 + \frac{z_F \cdot z_2}{i_y^2} \right).$$

Порівнюють експериментальні й теоретичні значення напружень. Для прийнятого в цій роботі значення  $z_F = \frac{d}{8}$  напруження в точці 1 повинно дорівнювати нулю. Для точки 2 визначають розбіжність між експериментальним й теоретичним значеннями:

$$\varepsilon = \left| \frac{\sigma_{2m} - \sigma_{2e}}{\sigma_{2m}} \right| \cdot 100\%.$$

#### Контрольні запитання

1. Що таке позацентровий стиск?
2. Як розподіляються за перерізом нормальні напруження при позацентровому стиску?
3. Що таке ядро перерізу?
4. Як обчислюють теоретичні напруження при позацентровому стиску?
5. Чому при випробуваннях тензометри треба розташовувати не ближче, ніж  $d$  від кінців зразка?
6. Якими приладами вимірюють деформації зразка?
7. Як здійснюється позацентровий стиск в роботі?
8. Як обчислюють експериментальні напруження?

## 2.21. Визначення критичної сили стиснутого шарнірно закріпленого на кінцях стержня

Мета роботи: експериментальне визначення критичної сили для стиснутого шарнірно закріпленого на кінцях стержня і порівняння одержаного значення з теоретичним.

Випробувальна машина та прилади

Випробування виконують на випробувальній машині УВМ-50 (п. 1.1).

Зразок для випробувань

Для випробувань використовують сталевий стержень колового перерізу  $d = 1,2$  см,  $\ell = 30$  см.

Зразок (поз. 1 на рис. 52) розміщують між верхньою нерухомою 2 і нижньою рухомою 3 опорами машини. Між зразком та опорами вкладають сталеві пластини 4. У цих пластинах, а також в торцях зразка зроблені заглиблення, в які вкладають кульки 5. Наявність кульок забезпечує закріплення кінців зразка, близьке до шарнірного.

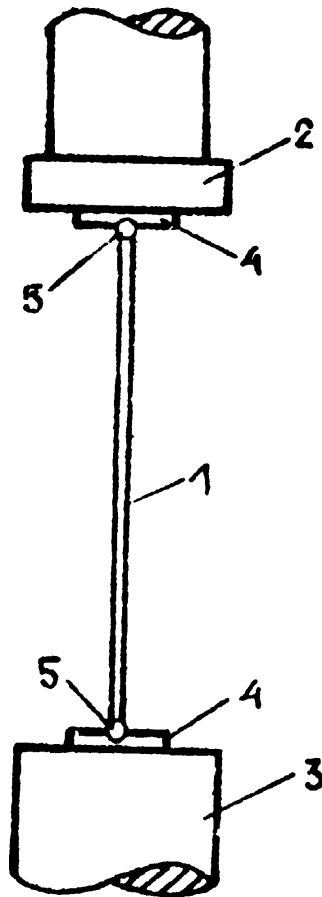


Рис. 52.

Основні відомості з теорії

Стан рівноваги прямого стиснутого стержня (рис.. 53) при деякому значенні навантаження  $F_{кр}$ , що називається критичним, стає нестійким. Втрата стійкості



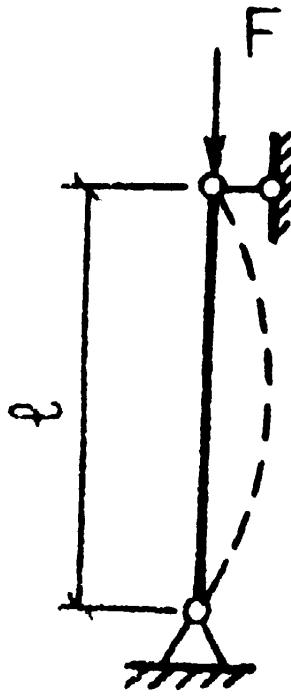


Рис. 53.

виражається в тому, що первісно прямий стержень викривляється (рис. 53).

Теоретична формула для критичної сили шарнірно закріпленого стержня одержана Ейлером:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 EI_{min}}{\ell^2},$$

де  $E$  - модуль пружності матеріалу;

$\ell$  - довжина стержня;

$I_{min}$  - мінімальний момент інерції перерізу стержня.

Для круглого перерізу

$$I_{min} = \frac{\pi d^4}{64}.$$

Формула Ейлера придатна за умови, що напруження в перерізах при втраті стійкості не перевищують межі пропорційності. Ця умова виконується при значеннях гнучкості  $\lambda$  стержня не менших, ніж деяке граничне значення  $\lambda_{пр}$

$$\lambda \geq \lambda_{пр}.$$

Граничне значення гнучкості залежить від матеріалу стержня:

$$\lambda_{пр} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{ти}}}$$

й для сталі ст. 3 становить 100.

Гнучкість шарнірно закріпленого стержня обчислюють за формулою

$$\lambda = \frac{\ell}{i_{min}},$$

де  $i_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}}$  - мінімальний радіус інерції перерізу. Для кола він становить

$$i_{min} = \frac{d}{4}.$$

Формула Ейлера дійсна для ідеального стержня. На практиці завжди маємо так звані початкові недовершеності: відхилення осі стержня від ідеальної прямої, відхилення в прикладанні стискувочої сили, відхилення у рівномірності розподілу пружних якостей матеріалу стержня і т. ін. При практичних розрахунках ці недовершеності вважаються малими і їхнім впливом на значення критичної сили нехтують.

#### Послідовність виконання роботи

На початку роботи вимірюють зразок: довжину –  $\ell$  та діаметр перерізу –  $d$ . Модуль пружності матеріалу (сталь)  $E=2,1 \cdot 10^5$  МПа.

Далі обчислюють момент інерції  $I_{min}$  перерізу та його радіус інерції  $i_{min}$ . Знайшовши гнучкість  $\lambda$  стержня, переконуються в тому, що вона не менша, ніж гранична пружність  $\lambda_{np}=100$ . Якщо ця умова виконана, дійсна формула Ейлера, отже, користуючись нею, обчислюють критичну силу  $F_{кр}$ .

Випробування починають, поступово збільшуючи навантаження  $F$  і постійно слідкуючи за його значенням. Стійкість стержня вичерпується раптово, цьому моменту відповідає зупинка зростання навантаження.

Найбільше навантаження  $F_{max}$ , досягнуте при випробуваннях, і є експериментальною критичною силою.

Розбіжність між експериментальним та теоретичним значеннями критичної сили обчислюють у відсотках:

$$\varepsilon = \left| \frac{F_{max} - F_{кр}}{F_{кр}} \right| \cdot 100 \%.$$

#### Контрольні запитання

1. Що таке втрата стійкості прямого стиснутого стержня?
2. Що таке критичне навантаження (сила)?
3. Як обчислюють теоретичне значення критичної сили?
4. В яких межах дійсна формула Ейлера?
5. Від чого залежить значення граничної гнучкості стержня?
6. Як здійснюється опирання зразка при випробуванні?
7. Як визначається експериментальне значення критичного навантаження?
8. Що таке початкові недовершеності? Як вони впливають на значення критичної сили?

## 2.22. Визначення питомої ударної в'язкості сталі

Мета роботи: визначення питомої ударної в'язкості сталі.

Випробувальна машина та прилади

Випробування на ударну в'язкість виконують на маятниковому копрі (п. 1.4).

Зразок для випробувань

Для випробувань використовують зразки типів I... V (рис. 54). Їх виконують з надрізами, щоб фіксувати місце перелому при випробуванні. Зразки I... III відрізняються глибиною прорізи, зразок IV має іншу форму прорізи, а зразок V зменшену ширину перерізу.

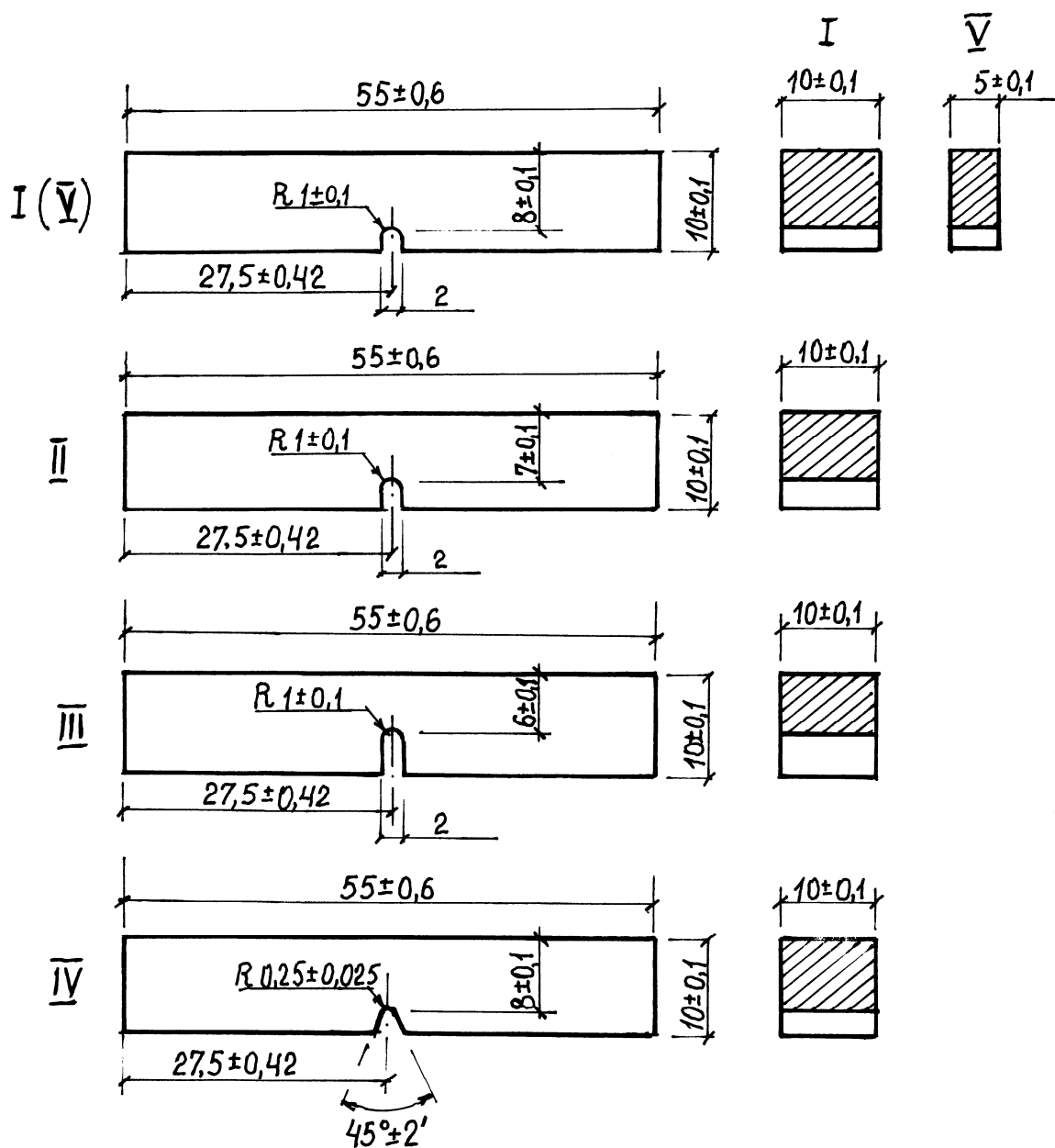


Рис. 54.

Зразки вирізають на металорізальних верстатах при умовах, що виключають наклеп та нагрів, щоб не змінити властивостей металу. Остаточну обробку виконують на металошліфувальних верстатах. Надріз здійснюють фрезеруванням або абразивним каменем.

#### Основні відомості з теорії

Ударна в'язкість – це складна комплексна характеристика, яка залежить від низки більш простих механічних властивостей. Останні визначають при статичних випробуваннях, тобто під дією дуже повільно зростаючих навантажень, отже вони не можуть характеризувати здатність матеріалу протистояти ударному навантаженню. Випробування на ударну в'язкість належать до динамічних видів випробувань, які застосовують для того, щоб оцінити здатність матеріалів протистояти ударним навантаженням та виявити їх схильність до крихкого руйнування.

Ударна в'язкість характеризується питомою роботою, витраченою на руйнування зразка:

$$d = \frac{W}{A},$$

де  $W$  - робота, витрачена на руйнування зразка,

$A$  - площа перерізу зразка у місці надрізу.

#### Послідовність виконання роботи

Перед початком випробувань заміряють зразок і записують величини  $b$  – ширину та  $h$  – висоту перерізу в місці надрізу.

Зразок кладуть горизонтально в спеціальний шаблон, який забезпечує розташування надрізу точно посередині прольоту (рис. 55).

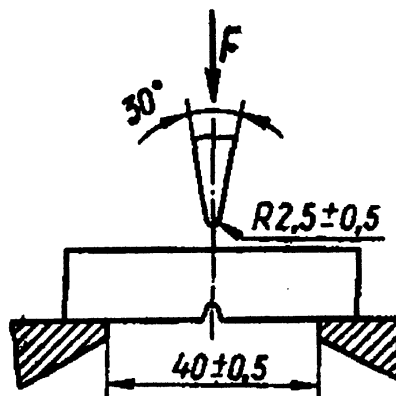


Рис. 55.

Удар виконують з боку, протилежного надрізу, в площині, перпендикулярній до поздовжньої осі зразка. На шкалі копра знімають відлік, який дає величину роботи  $W$ , витрачену на руйнування зразка.

Обчисливши площу перерізу зразка  $A = b \cdot h$ , визначають питому роботу руйнування зразка – питому ударну в'язкість.

### Контрольні запитання

1. Для чого застосовують динамічні випробування?
2. Що таке питома ударна в'язкість?
3. Для чого роблять надріз на зразках?
4. На якій машині проводять випробування?

## 2.23. Випробування сталі на стомленість при змінних за знаком напруженнях

Мета роботи: ознайомлення з методом визначення межі витривалості (стомленості) для сталі.

### Випробувальна машина та прилади

Випробування матеріалів на витривалість проводять на спеціальних машинах, які дозволяють навантажувати зразки змінними навантаженнями з частотою цикла 2000... 3000 за хвилину. Одна з таких машин наведена в п. 1.5.

### Зразок для випробувань

Для визначення межі витривалості сталі використовують циліндричний зразок, наведений на рис. 56.

На практиці для одержання вірогідних результатів випробування виконують для 6... 10 однакових зразків.

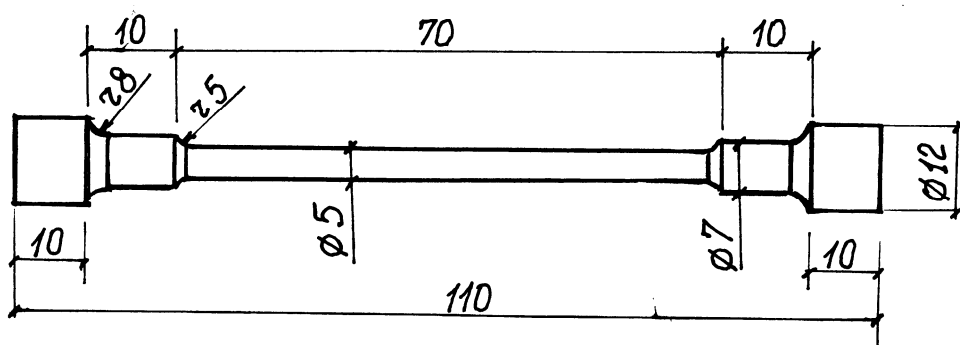


Рис. 56.

### Основні відомості з теорії

Відомо, що деталі машин та споруд, які протягом значного часу зазнають змінного за знаком навантаження, руйнуються без помітних залишкових деформацій при напруженнях значно менших, ніж межа міцності матеріалу. Це явище називають стомленістю матеріалів.

Як показали експерименти, межа міцності, інші механічні характеристики та структура матеріалу при змінних напруженнях не змінюються. Багатьма експериментами встановлено, що при дії протягом певного часу змінного за знаком напруження певної величини в перерізі елемента з'являється тріщина. Появу цієї тріщини слід чекати або в місцях найбільших напружень, або в місцях, де є дефекти матеріалу. В подальшому при дії змінних напружень ця тріщина зростає і розповсюджується на все більшу частину перерізу. Пластичні

деформації зосереджуються в місці тріщини, тому помітних залишкових деформацій на час руйнування не виявляється. Матеріал у тріщині стає гладким. Після того, як частина перерізу, ще не охоплена тріщиною, не може опиратися дії зовнішніх сил, елемент раптово руйнується. У перерізі руйнування виявляються дві зони: зовнішня – відшліфована і внутрішня – з крихким зломом.

За результатами статичних випробувань та випробуваннях на удар неможливо виявити здатність матеріалу опиратися тривалим змінним за знаком навантаженням. Для цього застосовують окремі випробування на стомленість, під час яких визначають межу витривалості (стомленості) матеріалу. Такою межею називають найбільше за абсолютним значенням напруження  $\sigma_t$ , яке не викликає руйнування стомленості при необмеженій кількості циклів навантаження.

#### Послідовність виконання роботи

Перший зразок встановлюють в машині й забезпечують навантаження  $2F$  (рис. 57) так, щоб напруження у розрахункових перерізах зразка (в зоні чистого згину  $CD$ ) дорівнювало  $0,5 \sigma_{max}$ .

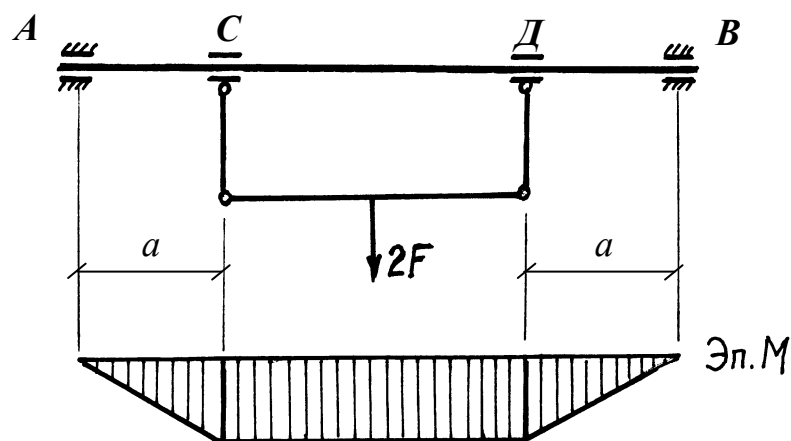


Рис. 57.

Значення сили  $F$  при цьому таке:

$$F = \frac{0,5\sigma_{max} \cdot W}{a},$$

де  $\sigma_{max}$  - межа міцності матеріалу,

$W$  - момент опору перерізу зразка,

$a$  - відстань від опор  $A$  та  $B$  до точок прикладання навантаження: відповідно точок  $C$  та  $D$ .

Вмикають машину, яка працює до руйнування зразка. Кількість циклів, які витримав зразок, фіксується лічильником.

Далі випробування виконують на другому зразку при зменшеному навантаженні. Зрозуміло, що при меншому навантаженні кількість циклів до руйнування збільшиться.

Випробування продовжують на інших зразках, поступово зменшуючи навантаження, і закінчують тоді, коли зразок буде витримувати до руйнування кількість циклів порядку  $10^7$ .

Вважається, якщо матеріал не зруйнувався при такій кількості циклів, то він може витримати нескінченно велику кількість циклів. Отже відповідне напруження можна вважати межею витривалості (стомленості)  $\sigma_t$  матеріалу.

Результати випробувань подають у вигляді діаграми (рис. 58), на якій вздовж ординати відкладають напруження, а вздовж абсциси – відповідну кількість витриманих циклів.

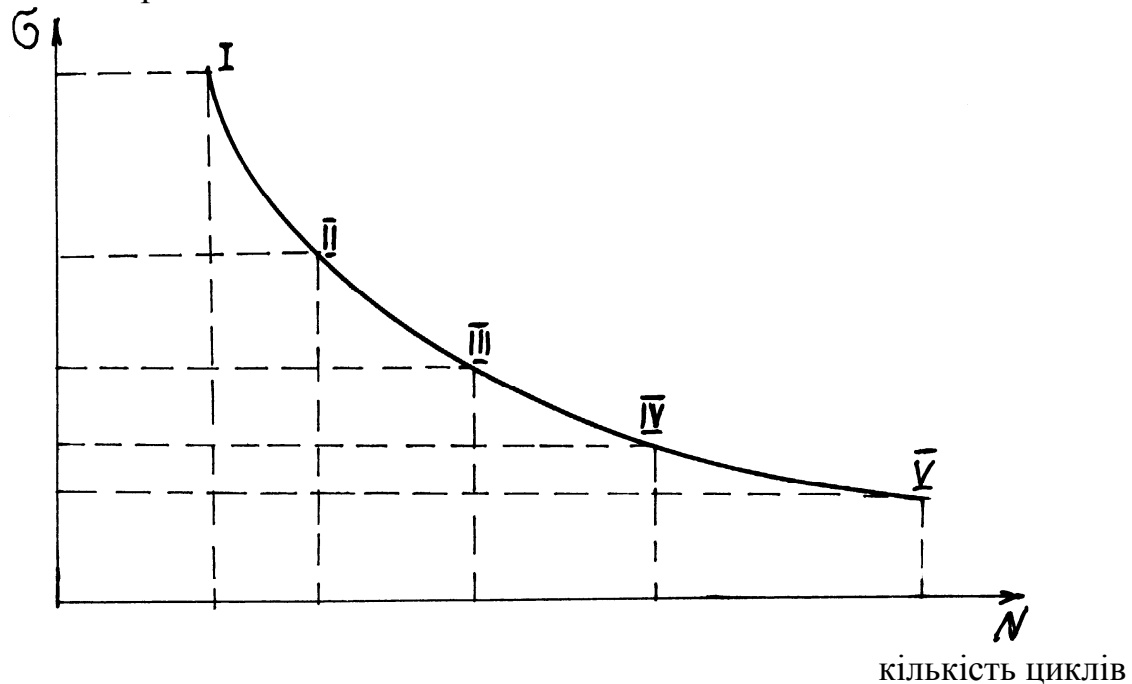


Рис. 58.

Крива на цій діаграмі називається кривою Велера.

#### Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Як влаштована машина для випробувань на витривалість?
3. Який зразок використовують для випробувань?
4. Що називається межею витривалості (стомленості) матеріала?
5. Як визначити напруження від прикладеного на машині навантаження?
6. В якій послідовності виконують випробування?
7. Що таке крива Велера? Як на цій кривій визначити межу витривалості матеріалу?

## Додаток

Таблиця 1 -Механічні характеристики деяких сталей

Матеріал	Марка	Межа		Відносне подовження $\varepsilon$	Відносне звуження $\psi$	Твердість за Брінелем НВ	Ударна в'язкість КС кДж/м <sup>2</sup>
		текучості $\sigma_t$ , МПа	міцності $\sigma_{max}$ , МПа				
Сталь вуглецева: звичайної якості  Гарячекатана	Ст. 2	220	340... 420	0,31	—	140	
	Ст. 3	240	380... 470	0,25... 0,27	—	—	
	Ст. 4	260	420... 520	0,23.. 0,25	—	—	
	Ст. 5	280	500... 620	0,19... 0,21	—	—	
Сталь вуглецева: якісна  Конструкційна	30	290	480	0,21	0,5	179	300... 400
	35	310	520	0,20	0,45	187	250... 350
	40	320	570	0,19	0,45	217	260... 300
	45	340	600	0,16	0,40	241	200... 300
	50	350	630	0,14	0,40	241	250... 300
Сталь хромиста	40х	800	1000	0,10	0,45	217	600
	50х	900	1100	0,08	0,40	229	400
Сталь хромонікелева	40ХН	800	1000	0,11	0,10	207	700
	50ХН	900	1100	0,09	0,08	207	500



# Додаток

Таблиця 2 - Механічні характеристики деяких чавунів

Матеріал	Марка	Межі міцності, МПа при					Стріла прогину (м) при відстані між опорами 0,6 м	Твердість за Брінелем НВ	Ударна в'язкість за Брінелем НВ	Межа витривалості Мпа	
		розтягу	тиску	згині	зрізі	крученні				гладкого зразка при згині	при крученні
Модифікований чавун	сч 21	210	750	400	220	280	0,009	171... 241	90	100	80
	сч 24	240	850	440	300	300	0,009	190... 220	90	120	100
	сч 28	280	1000	480	350	350	0,009	170... 240	100	140	110
Ковкий чавун	кч 30-3	200	—	490	280	340	—	160	80	120	110
	кч 33-8	210	—	530	290	345	—	160	130	130	120
	кч 35-10	220	—	570	300	350	—	150	140	140	130

## Список літератури

1. Методические указания к выполнению лабораторных работ по сопротивлению материалов. В.П.Пустовойтов, Г.Е.Петушков, Ю.М.Смолянинов, В.Л.Ингульцов, Н.В.Середа, И.А.Палевский, Л.П.Кушнырь. – Харьков: ХИИГХ, 1991. – 80 с.
2. Сопротивление материалов /Под ред. Г.С.Писаренко. – 5-е изд. – К.: Высш. шк., 1986.
3. Цурпал И.А., Барабан Н.П., Швайко В.М. Сопротивление материалов, лабораторные работы. – 2-е изд. – К.: Высш. шк., 1988.

## Навчальне видання

Опір матеріалів. Навчально-методичний посібник до лабораторних робіт (для студентів 1-3 курсів технічних спеціальностей академії)

Укладачі: Леонід Миколайович Шутенко,  
Володимир Павлович Пустовойтов,  
Микола Андрійович Засядько

Редактор: М.З.Аляб'єв  
Коректор: З.І.Зайцева

План 2004, поз. 12

---

Підп. до друку 9.09.2004	Формат 60 x 84 1/16	Папір офісний
Друк. на ризографі	Умовн.-друк. арк. 4,0	Обл.-вид. арк. 4,8
Тираж 100 прим.	Зам. №_____	Ціна договірна

---

61002, Харків, ХНАМГ, вул. Революції, 12

---

Сектор оперативної поліграфії ІОЦ ХНАМГ  
61002, м. Харків, вул. Революції, 12